



TUGAS AKHIR - TE 141599

***APLIKASI SLIDING MODE CONTROLLER PADA SISTEM
PNEUMATIC-HYDRAULIC COMBINATION CONTROL***

Denny Ferdian
NRP 2212100065

Dosen Pembimbing
Ir. Joko Susila, MT.
Imam Arifin, ST., MT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



FINAL PROJECT - TE 141599

***APPLICATION OF SLIDING MODE CONTROLLER ON
PNEUMATIC-HYDRAULIC COMBINATION CONTROL SYSTEM***

Denny Ferdian
NRP 2212100065

Supervisor
Ir. Joko Susila, MT.
Imam Arifin, ST., MT.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul

**“APLIKASI *SLIDING MODE CONTROLLER* PADA SISTEM
PNEUMATIC-HYDRAULIC COMBINATION CONTROL”**

adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juni 2016

Denny Ferdian
NRP 2212100065

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

**APLIKASI SLIDING MODE CONTROLLER PADA SISTEM
PNEUMATIC-HYDRAULIC COMBINATION CONTROL**

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I,

Dosen Pembimbing II,

Ir. Joko Susila, MT.
NIP: 196606061991021001

Imam Arifin, ST., MT.
NIP: 197302222002121001



-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

APLIKASI *SLIDING MODE CONTROLLER* PADA SISTEM *PNEUMATIC-HYDRAULIC COMBINATION CONTROL*

Nama : Denny Ferdian
NRP : 22 12 100 065
Pembimbing 1 : Ir. Joko Susila, MT.
NIP : 196606061991021001
Pembimbing 2 : Imam Arifin, ST., MT.
NIP : 197302222002121001

ABSTRAK

Sistem pengaturan posisi pada *Pneumatic-Hydraulic Combination Control* (PHCC) merupakan permasalahan *tracking* sistem mekanik. Sistem PHCC merupakan kombinasi antara sistem pneumatik dan hidrolik. Konsep *tracking* adalah bagaimana respon keluaran dapat mengikuti sinyal referensi sedekat mungkin. Nonlinieritas pada sistem PHCC terjadi karena penggunaan katup solenoid *on/off* yang terhubung dengan silinder pneumatik-hidrolik Metode kontrol *sliding mode* dirancang untuk meningkatkan kepresisian dan kecepatan dari silinder pneumatik-hidrolik saat melakukan *tracking* sinyal referensi. Dengan diterapkan metode ini, kecepatan dan kepresisian dari silinder pneumatik-hidrolik meningkat dengan *rise time* yang dibutuhkan sistem tanpa kontroler 11,3 detik menjadi 10 detik untuk *tracking* posisi silinder. Kesalahan pembacaan posisi silinder yang semula 0,5 mm menjadi 0,3 mm.

Kata Kunci : PHCC, *Sliding Mode Control*, *Tracking Position*, Pneumatik, Nonlinieritas

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

APPLICATION OF SLIDING MODE CONTROLLER ON PNEUMATIC-HYDRAULIC COMBINATION CONTROL SYSTEM

Name : Denny Ferdian
Register Number : 22 12 100 065
Supervisor 1 : Ir. Joko Susila, MT.
ID Number : 196606061991021001
Supervisor 2 : Imam Arifin, ST., MT.
ID Number : 197302222002121001

ABSTRACT

In pneumatic system, pressured air that has high compressibility is used as the transmission media. Pressure which produced in this system is low. Using this media has weaknesses in example high compressibility. Consequences, speed is slow and precission rate of cylinder is low. Resolving this problem, Pneumatic-Hydraulic Combination Control (PHCC) systems is applied which combination between pneumatic and hydraulic system. This research discusses about PHCC system that includes nonlinear system. Nonlinearity occur while the system is changing from charging to discharging mode or vice versa. This method has low sensitivity while applied to nonlinear system(s). The advantages of applying sliding mode control, speed and precission rate of pneumatic-hydraulic cylinder increased. Sliding Mode Controller be able to drive system to track position. This has been proven by experiment which shows cylinder's rise time to get to desired position was 10 seconds at 0.3 mm for any initial condition.

Keywords : PHCC, Sliding Mode Control, Tracking Position, Pneumatic System, Nonlinearity

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Allah SWT atas berkat rahmat dan hidayah-Nya Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik. Shalawat serta salam semoga selalu dilimpahkan kepada Nabi Besar Muhammad SAW, keluarga, sahabat, dan umat muslim yang senantiasa meneladani beliau.

Penelitian ini disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan guna menyelesaikan pendidikan S-1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan judul:

“APLIKASI SLIDING MODE CONTROLLER PADA SISTEM PNEUMATIC-HYDRAULIC COMBINATION CONTROL”

Penulis mengucapkan terima kasih kepada kedua orang tua, keluarga, saudara, Bapak Joko Susila, Bapak Imam Arifin, segenap dosen bidang studi Teknik Sistem Pengaturan atas segala bimbingan ilmu, moral, dan spiritual dari awal hingga terselesaikannya penelitian ini, dan teman-teman di Lab. AJ-104 yang selalu memberikan doa, semangat, serta dukungan.

Penulis juga mengucapkan banyak terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu baik secara langsung maupun tidak langsung dalam proses penyelesaian penelitian ini. Penulis menyadari masih banyak kekurangan pada penelitian ini dan memohon maaf jika terdapat kesalahan.

Surabaya, Juni 2016

Penulis

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

DAFTAR ISI

	HALAMAN
HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN JUDUL.....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	v
HALAMAN PENGESAHAN	vii
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	xi
KATA PENGANTAR.....	xiii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan	2
1.5 Metodologi Penelitian	2
1.6 Sistematika Laporan.....	3
1.7 Relevansi	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Sistem Pneumatik.....	5
2.1.1 Deskripsi Sistem Pneumatik.....	5
2.1.2 Karakteristik Fluida pada Sistem Pneumatik.....	6
2.1.3 Keuntungan dan Kerugian Sistem Pneumatik	7
2.1.4 Komponen Penyusun Sistem Pneumatik	8
2.1.5 Desain Rangkaian Sistem Pneumatik	11
2.1.6 Aplikasi Sistem Pneumatik	12
2.1.7 Prosedur Keamanan dalam Sistem Pneumatik	13
2.2 Sistem Hidrolik	14
2.2.1 Definisi Sistem Hidrolik.....	14
2.2.2 Karakteristik Fluida pada Sistem Hidrolik	16
2.2.3 Keuntungan dan Kerugian Sistem Hidrolik.....	16
2.2.4 Komponen Penyusun Sistem Hidrolik	17

2.2.5 Aplikasi Sistem Hidrolik.....	19
2.2.6 Desain Rangkaian Sistem Hidrolik	20
2.3 Sistem PHCC	21
2.3.1 Deskripsi Sistem PHCC	21
2.3.2 Silinder Pneumatik-Hidrolik	22
2.4 <i>Sliding Mode Control</i>	22
2.4.1 <i>Sliding Surface</i>	23
2.4.2 <i>Control Law</i>	24
2.5 Kestabilan Lyapunov	25
2.5.1 <i>Second Method of Lyapunov</i>	25
BAB III PERANCANGAN SISTEM.....	27
3.1 <i>Sliding Mode Controller</i>	27
3.2 Penentuan <i>Sliding Surface</i>	27
3.3 Penentuan <i>Control Law</i>	29
3.4 Pemodelan <i>Plant</i>	31
BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISA.....	37
4.1 Respon <i>Open Loop</i> Sistem PHCC Tanpa Kontroler	37
4.2 Pengujian dengan Perubahan Parameter <i>Sliding Mode</i>	37
4.2.1 Performansi <i>Tracking</i>	37
4.2.2 Sinyal Kesalahan.....	42
4.2.3 <i>Sliding Surface</i>	45
4.2.4 <i>Control law</i>	47
BAB V PENUTUP	51
5.1 Kesimpulan	51
5.2 Saran	51
DAFTAR PUSTAKA.....	53
RIWAYAT PENULIS	55
LAMPIRAN A	57
LAMPIRAN B.....	58

DAFTAR GAMBAR

HALAMAN

Gambar 2.1. Silinder Kerja Tunggal.....	9
Gambar 2.2. Silinder Kerja Ganda	10
Gambar 2.3. Simbol untuk Katup Pengaturan Arah 5/2	10
Gambar 2.4 Aturan Dasar Penggambaran Rangkaian Pneumatik	12
Gambar 2.5. Sistem Pneumatik pada Industri Percetakan	12
Gambar 2.6. Sistem Pneumatik pada Pintu Bus	13
Gambar 2.7 Prinsip Kerja Berdasarkan Hukum Pascal	15
Gambar 2.8. Klasifikasi Katup Pengatur Arah	18
Gambar 2.9 Katup 4/3 pada Rangkaian Hidrolik	20
Gambar 2.10. Diagram Fisik Sistem PHCC	22
Gambar 2.11. Silinder Pneumatik-Hidrolik.....	22
Gambar 2.12. Trayektori Bergerak ke <i>Sliding Surface</i>	24
Gambar 3.1. Diagram Blok Sistem PHCC dengan SMC.....	27
Gambar 3.2. <i>Free Body Diagram</i> Sistem Pneumatik	32
Gambar 4.1. Respon <i>Open Loop</i> Sistem PHCC	37
Gambar 4.2. <i>Tracking</i> Sinyal Referensi saat $\lambda = 50$	38
Gambar 4.3. <i>Tracking</i> Sinyal Referensi saat $\lambda = 35$	39
Gambar 4.4. <i>Tracking</i> Sinyal Referensi saat $\lambda = 20$	40
Gambar 4.5. <i>Tracking</i> Sinyal Referensi saat $\lambda = 5$	40
Gambar 4.6. <i>Tracking</i> Sinyal Referensi saat $\lambda = 0$	41
Gambar 4.7. Sinyal Kesalahan untuk $\lambda = 50$	42
Gambar 4.8. Sinyal Kesalahan untuk $\lambda = 35$	43
Gambar 4.9. Sinyal Kesalahan untuk $\lambda = 20$	43
Gambar 4.10. Sinyal Kesalahan untuk $\lambda = 5$	44
Gambar 4.11. <i>Sliding Surface</i> untuk $\lambda = 50$	45
Gambar 4.12. <i>Sliding Surface</i> untuk $\lambda = 35$	45
Gambar 4.13. <i>Sliding Surface</i> untuk $\lambda = 20$	46
Gambar 4.14. <i>Sliding Surface</i> untuk $\lambda = 5$	46
Gambar 4.15. <i>Sliding Surface</i> untuk $\lambda = 0$	47
Gambar 4.16. <i>Control Law</i> untuk $\lambda = 50$	47
Gambar 4.17. <i>Control Law</i> untuk $\lambda = 35$	48
Gambar 4.18. <i>Control Law</i> untuk $\lambda = 20$	48
Gambar 4.19. <i>Control Law</i> untuk $\lambda = 5$	49
Gambar 4.20. <i>Control Law</i> untuk $\lambda = 0$	49

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

DAFTAR TABEL

HALAMAN

Tabel 2.1. Konversi Satuan Tekanan dalam Sistem Pneumatik	7
Tabel 2.2. Keuntungan dan Kerugian Penggunaan Sistem Pneumatik....	7
Tabel 2.3. Aturan Penulisan Simbol Pneumatik.....	11
Tabel 2.4. Prosedur Keamanan Penggunaan Sistem Pneumatik.....	13
Tabel 2.5 Keuntungan dan Kerugian Penggunaan Sistem Hidrolik	16
Tabel 2.6 Aplikasi Sistem Hidrolik dalam Berbagai Bidang.....	19
Tabel 2.7 Aturan Penulisan Simbol pada Rangkaian Hidrolik	21
Tabel 3.1. Parameter pada Sistem PHCC	31
Tabel 4.1 Perbandingan Parameter <i>Sliding</i> dengan Nilai Kesalahan.....	44

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem pneumatik saat ini semakin banyak digunakan di dunia industri karena media transmisinya yang berupa udara mampat memiliki sejumlah keuntungan. Di antaranya adalah tidak mudah terbakar, tidak mencemari udara, tahan terhadap interferensi radiasi gelombang elektromagnetik, dan dapat bekerja dalam lingkungan yang buruk[1]. Namun, bukan berarti sistem ini tidak memiliki kelemahan yakni tingkat kompresi tinggi dari media transmisinya sehingga menyebabkan ketidakpresisian dan kecepatan pada silinder lebih lambat[2].

Pada dunia industri yang membutuhkan ketepatan dan kecepatan, hal ini tentu saja menghambat. Untuk mengatasi permasalahan mengenai ketepatan dan kecepatan pada silinder pneumatik, digunakan sistem PHCC yang murah namun memiliki kecepatan yang tidak jauh berbeda dengan sistem hidrolik murni. Sistem pneumatik dikombinasikan dengan sistem hidrolik melalui mekanisme kerja sekuensial. Kombinasi ini dapat menutupi kelemahan dari masing-masing sistem[3]. Sistem ini digunakan pada atap truk megatrailer. Truk megatrailer harus membuka atapnya untuk melakukan *loading* dan *unloading* barang sehingga dapat dimasukkan ke dalam kontainer.

Metode pengendalian yang dapat diaplikasikan pada sistem PHCC dan diajukan sebagai metode dalam penelitian ini adalah metode *Sliding Mode Control*. Metode ini dapat diimplementasikan pada sistem yang memiliki *plant* nonlinier. Prinsip kerja *Sliding Mode Control* adalah pensaklaran berfrekuensi tinggi. Trayektori yang memiliki nilai awal sembarang akan menuju ke titik kesetimbangan melalui *sliding surface* dan mempertahankan nilainya di sekitar permukaan ini dengan *control law* yang sesuai pada bidang fasa[4]. Dalam implementasinya pada sistem riil, trayektori yang berupa respon dari *plant* dengan berbagai kondisi awal akan bergerak menuju sinyal referensi atau melakukan *tracking* posisi. Pada penelitian sebelumnya mengenai penggunaan metode *Sliding Mode Control* pada sistem pneumatik[5], kesalahan dalam *tracking* posisi silinder memiliki nilai yang besar yaitu untuk silinder dengan rentang 4 cm kesalahannya mencapai lebih dari 1 cm.

Oleh karena itu, penggunaan metode *Sliding Mode* yang memanfaatkan prinsip pensaklaran dapat memperbaiki tingkat kesalahan ini.

1.2 Perumusan masalah

Sistem pneumatik merupakan sistem yang menggunakan udara mampat sebagai mekanisme transfer daya. Tetapi, udara mampat yang digunakan pada sistem pneumatik memiliki tingkat kompresi tinggi sehingga menyebabkan kecepatan lambat dan kepresisian pada silinder rendah[5]. Sistem PHCC dirancang untuk mengatasi masalah ini. Permasalahan lain timbul oleh karena sifat nonlinier dari plant yang menyebabkan pengaturan posisi dari silinder menjadi sulit. Sifat nonlinier ini disebabkan oleh penggunaan *on/off solenoid katup* sehingga terjadi *relay nonlinearity*. Diperlukan sebuah kontroler untuk memperbaiki performa dan melakukan pengaturan posisi pada silinder.

1.3 Batasan Masalah

Nilai perbandingan kapasitas panas (k) pada silinder yang digunakan sama yakni 1,4. Nilai k berpengaruh pada saat penurunan hukum gas ideal. Fluida pada sistem pneumatik adalah udara yang dimampatkan dengan massa jenis 1 gr/cm^3 . Pada sistem hidrolik, digunakan minyak dengan massa jenis $27,2 \text{ gr/cm}^3$.

1.4 Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem kombinasi pneumatik hidrolik serta kontroler yang sesuai untuk memperbaiki respon plant saat melakukan *tracking* posisi. Kontroler yang telah dibuat diimplementasikan pada sistem PHCC. Dengan merancang model kombinasi sistem pneumatik-hidrolik maka kecepatan dan posisi silinder meningkat. Sementara dengan mengimplementasikan *Sliding Mode Controller* pengaturan posisi lebih presisi.

1.5 Metodologi Penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan pengerjaan yaitu, studi literatur, pemodelan sistem, perancangan algoritma kontrol, simulasi hasil desain, implementasi dan analisis data, dan penyusunan laporan berupa Buku Tugas Akhir.

Tahapan pertama dalam penelitian yang dilakukan adalah mencari studi literatur. Tujuannya untuk memahami karakteristik dan parameter silinder pneumatik-hidrolik. Tahap ini meliputi kegiatan pengumpulan

data atau informasi dari literatur dan buku-buku teks yang relevan dengan penelitian ini, termasuk *datasheet* dan *manual book* dari komponen-komponen penyusun *plant*. Pemodelan dilakukan dengan menurunkan persamaan dari hukum fisis. Setelah mendapatkan parameter yang digunakan, dilakukan pemodelan sistem dan perancangan kontroler.

Eksperimen dilakukan dengan menganalisa respon saat *plant* diimplementasikan dengan kontroler yang menggunakan masukan sinyal *step* dan sinus melalui simulasi pada *software*. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah *Sliding Mode Control*. Dari hasil analisa, diambil kesimpulan dari kegiatan yang telah dilakukan. Tahap akhir penelitian adalah penyusunan Buku Tugas Akhir.

1.6 Sistematika Laporan

Pembahasan Tugas Akhir ini akan dibagi menjadi lima Bab dengan sistematika sebagai berikut:

Bab I Pendahuluan

Bab ini meliputi latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, metodologi penelitian, sistematika laporan, dan relevansi.

Bab II Tinjauan Pustaka

Bab ini menjelaskan tentang Sistem PHCC, *pneumatic-hydraulic cylinder*, konsep *Sliding Mode Control*, dan pemodelan *plant*.

Bab III Perancangan Sistem

Bab ini membahas desain dan perancangan algoritma *Sliding Mode Control* berdasarkan teori pada Bab II.

Bab IV Pengujian dan Analisa

Bab ini menampilkan simulasi dan implementasi pada *plant* serta analisa dari hasil yang didapatkan.

Bab V Penutup

Bab ini berisi kesimpulan dan saran dari hasil penelitian yang telah dilakukan.

1.7 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari penelitian ini diharapkan menjadi referensi perancangan kontroler dan penentuan metode kontrol yang tepat untuk diimplementasikan pada sistem PHCC.

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Sistem daya fluida merupakan perpindahan energi menggunakan fluida yang dimampatkan. Pada sistem hidrolik, fluida yang digunakan adalah minyak atau air sementara sistem pneumatik menggunakan udara. Dibandingkan dengan teknologi aktuasi lain, sistem daya fluida mampu menghasilkan gaya dan daya yang lebih besar serta mampu menghasilkan kekuatan yang sangat tinggi dengan aktuator silinder yang relatif ringan. Sistem daya fluida memiliki lebar pita yang lebih tinggi daripada motor listrik dan dapat digunakan pada peralatan yang membutuhkan *starting* cepat, berhenti dan pembalikan arah, atau osilasi frekuensi tinggi. Keuntungan lainnya dari daya fluida adalah kekompakan dan fleksibilitas. Silinder pneumatik atau hidrolik yang relatif kecil dan ringan untuk sistem lain dengan fungsi yang sama memiliki sifat yang fleksibel sehingga tidak mengurangi gaya dan daya yang dihasilkan.

Sistem daya fluida memiliki beberapa kelemahan selain keuntungan tersebut. Sistem daya hidrolik dapat mengalami kebocoran minyak pada sambungan dan segel. Fluida pada sistem hidrolik dapat mengalami kavitasi atau pembentukan gelembung gas pada pompa karena tekanan sangat rendah mencapai dibawah tekanan uap sehingga air menguap karena tekanan yang sangat rendah. Akibatnya, fluida mempertahankan udara sehingga menghasilkan *spongy performance* dan hilangnya kepresisian yang menghasilkan sistem hidrolik dan pneumatik dapat terkontaminasi oleh partikel dan membutuhkan penyaringan dengan penanganan khusus. Berdasarkan jenis fluida yang digunakan, sistem daya fluida dibagi menjadi dua : sistem pneumatik dan sistem hidrolik.

2.1 Sistem Pneumatik

2.1.1 Deskripsi Sistem Pneumatik

Pneumatik merupakan sistem yang menggunakan udara mampat sebagai media transfer energi. Sistem ini memiliki banyak keuntungan dalam aplikasi di kehidupan sehari-hari di antaranya mudah dalam penggunaan, tidak membutuhkan biaya yang mahal, serta tingkat keamanan yang tinggi. Udara bertekanan yang digunakan memiliki nilai bervariasi sesuai dengan kebutuhan dari pengguna.

Untuk penggunaan di tingkat laboratorium, nilainya sebesar 4-8 atm. Sedangkan penggunaan di bidang industri, nilainya sebesar 9-12 atm[2]. Dua keuntungan utama dari sistem pneumatik adalah murah dan desain yang sederhana. Biaya perancangan sistem pneumatik kurang dari satu sirkuit hidrolik tetapi biaya operasi bisa lima sampai sepuluh kali lebih tinggi. Memampatkan udara atmosfer ke tekanan kerja nominal membutuhkan banyak energi. Motor udara adalah salah satu komponen yang paling mahal untuk dioperasikan. Diperlukan waktu sekitar satu menit untuk memampatkan 4 cfm dari udara atmosfer ke 100 psi. Sebuah motor udara standar memiliki kapasitas hingga 60 cfm untuk beroperasi, sehingga motor udara membutuhkan 15 kompresor untuk bergerak. Untungnya, motor udara tidak harus terus bergerak tetapi dapat dinyalakan saat diperlukan. Mesin yang menggunakan udara mampat lebih tenang daripada yang menggunakan sistem hidrolik. Hal ini terjadi karena sumber daya(kompresor udara) dipasang di tempat yang berjarak jauh dari mesin.

2.1.2 Karakteristik Fluida pada Sistem Pneumatik

Udara terdiri dari campuran gas dengan persentase 21% oksigen, 78% nitrogen, dan 1% udara lain contohnya argon dan karbon dioksida. Penentuan persentase tersebut berdasarkan volume gas. Udara juga mengandung hingga 4% uap air bergantung kepada kelembapan. Persentase uap air di atmosfer bisa berubah secara konstan tiap jam meskipun diukur pada tempat yang sama.

Udara yang digunakan pada sistem pneumatik adalah udara mampat. Udara memiliki karakteristik mudah dimampatkan dan volume dapat berubah-ubah sesuai dengan wadahnya karena molekul udara memiliki energi internal substansial. Udara bebas didefinisikan sebagai udara pada kondisi atmosfer normal. Karakteristik udara bebas berubah selama tekanan dan suhu atmosfer berubah bergantung waktu. Bumi dikelilingi oleh lapisan udara yang dinamakan atmosfer. Tekanan pada atmosfer mengacu pada besarnya tekanan yang diukur di permukaan laut sebesar 14.7 psi (101 kPa). Standar tekanan 14.7 psi juga digunakan untuk melakukan perhitungan tekanan pada rangkaian pneumatik. Udara merupakan elemen yang memiliki berat, sehingga memiliki karakteristik yakni massa jenis dan temperatur. Massa jenis untuk udara adalah $0,0752 \text{ lb/ft}^3$ pada 14,7 psia dan temperatur 68°F ($11,8 \text{ N/m}^3$ pada 101 kPa abs dan 20°C).

Udara standar adalah udara pada permukaan laut yang memiliki suhu 68°F, tekanan 14,7 psia (20°C dan 101 kPa abs) dan kelembapan relatif 36%. Istilah udara standar digunakan saat membuat perhitungan rangkaian pneumatik. Untuk melakukan perhitungan tekanan pada rangkaian pneumatik maka harus mempertimbangkan volume dan tekanan udara. Perubahan karakteristik pada udara juga berhubungan dengan dan suhu mutlak. Satuan standar internasional untuk tekanan adalah Pascal (Pa) sedangkan di bidang industri menggunakan kilo Pascal (kPa) dan Mega Pascal (MPa). Tabel 2.1 menunjukkan konversi satuan yang banyak digunakan dalam sistem ini.

Tabel 2.1. Konversi Satuan Tekanan dalam Sistem Pneumatik

Dari	Ke	Nilai
Pascal	<i>Pascal (Pa)</i>	1 Pa
	<i>Atmosphere (atm)</i>	1,013 x 10 ⁵ atm
	<i>Bar</i>	10 ⁵ bar
	<i>Pressure square inch (psi)</i>	6895 psi

2.1.3 Keuntungan dan Kerugian Sistem Pneumatik

Sistem pneumatik memiliki banyak kelebihan, tetapi penggunaan dari fluida dan sifat mekanis dari komponen mengakibatkan kekurangan yang merugikan. Tabel 2.2 menjelaskan bagaimana keuntungan dan kerugian dalam pemanfaatan sistem pneumatik secara umum di kehidupan sehari-hari dan khususnya di dunia industri.

Tabel 2.2. Keuntungan dan Kerugian Penggunaan Sistem Pneumatik

No	Keuntungan	Kerugian
1	Keefektifan tinggi	Akurasi rendah
2	Daya tahan dan Keandalan	Pembebanan kecil
3	Desain sederhana	Fluida harus diproses sebelum digunakan
4	Kemampuan beradaptasi	Pergerakan piston tidak sama

No	Keuntungan	Kerugian
5	Keamanan	Kebisingan
6	Ramah lingkungan	
7	Murah	

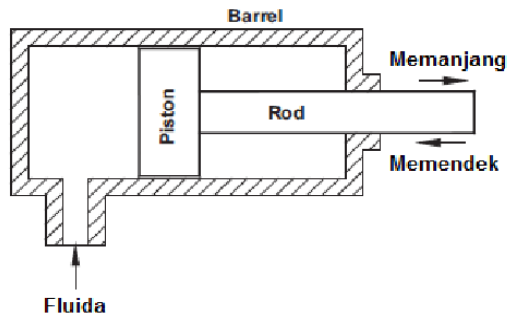
2.1.4 Komponen Penyusun Sistem Pneumatik

Terdapat lima komponen penyusun sistem pneumatik, yakni elemen suplai energi, elemen input, elemen proses, elemen kontrol, dan komponen penggerak (aktuator). Elemen suplai energi berfungsi untuk menyediakan daya dan energi yang dibutuhkan oleh sistem, contohnya kompresor dan unit servis. Elemen input memiliki fungsi sebagai pemberi masukan dan perintah pada sistem, contohnya katup tekan atau katup rol. Untuk elemen proses, fungsinya sebagai tempat terjadi perubahan variabel, contohnya katup pengatur tekanan atau *timer*. Elemen kontrol memiliki fungsi sebagai pemberi kendali utama yang diteruskan pada aktuator, contohnya katup pengatur arah. Komponen penggerak (aktuator) berfungsi sebagai penggerak akhir, contohnya silinder pneumatik atau motor. Udara yang digunakan pada komponen memiliki tekanan relatif rendah, sehingga komponen bisa dibuat dari bahan yang tidak mahal, contohnya plastik yang telah dibentuk, *zinc* atau aluminium. Komponen yang diproduksi oleh perusahaan yang berbeda dapat menghasilkan perbedaan dalam tampilan dan ukuran. Meskipun berbeda dalam bentuk fisik, fungsi dan cara pengoperasiannya sama. Komponen pneumatik dapat dibagi menjadi dua kategori : komponen yang menghasilkan dan menyalurkan udara mampat serta komponen yang memanfaatkan udara mampat.

Komponen penghasil dan penyalur udara mampat yakni kompresor. Sebuah kompresor dapat memampatkan udara hingga tekanan yang dibutuhkan. Kompresor dapat mengubah energi mekanik dari motor menjadi energi potensial dalam udara mampat. Sebuah kompresor pusat tunggal dapat menyuplai berbagai macam komponen pneumatik dengan udara mampat yang disalurkan melalui pipa dari silinder menuju komponen pneumatik menggunakan selang. Kompresor dapat dibagi menjadi dua jenis berdasarkan gerak putar motornya : bujursangkar dan melingkar.

Komponen pengatur tekanan dibentuk dari berbagai komponen. Komponen tersebut adalah *Filter*, *Regulator*, dan *Lubricator*. *Filter* mampu menghilangkan ketidakmurnian dari udara mampat yang mungkin masih mengandung uap, air, atau debu sebelum disalurkan ke komponen pneumatik lainnya. *Regulator* berfungsi untuk menstabilkan tekanan dan mengatur pengoperasian komponen pneumatik. *Lubricator* berfungsi menghasilkan pelumasan untuk komponen pneumatik sehingga komponen tidak mudah rusak dan macet.

Komponen yang menggunakan udara mampat ada tiga macam, yakni Komponen eksekusi, Katup Pengaturan Arah, dan Katup Pengatur. Komponen eksekusi pneumatik menghasilkan pergerakan bujursangkar atau melingkar. Contoh komponen eksekusi pneumatik termasuk piston silinder, motor pneumatik, dan sebagainya. Gerak bujursangkar diproduksi oleh piston silinder, sementara motor pneumatik memberikan gerak melingkar secara terus menerus. Ada banyak jenis silinder, seperti silinder kerja tunggal dan ganda. Silinder kerja tunggal hanya memiliki satu pintu masuk yang memungkinkan udara mampat mengalir melalui selang. Oleh karena itu, piston hanya menghasilkan dorong satu arah seperti pada Gambar 2.1. Batang piston didorong ke arah yang berlawanan dengan pegas internal atau dengan gaya eksternal yang disediakan oleh gerakan mekanis atau berat beban.

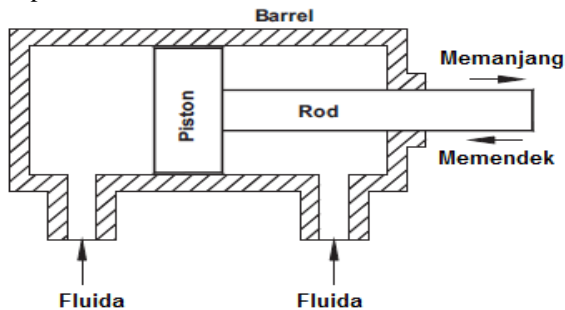


Gambar 2.1. Silinder Kerja Tunggal

Dorongan dari batang piston berkurang karena berlawanan dengan gaya dari pegas. Untuk memberikan kekuatan pendorong pada mesin, maka

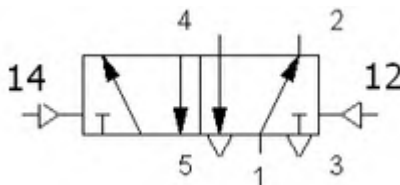
diameter silinder harus ditingkatkan. Silinder kerja tunggal digunakan di bidang percetakan, pengecapan, dan sebagainya.

Pada silinder kerja ganda, tekanan udara diberikan secara bergantian ke permukaan piston, menghasilkan kekuatan pendorong dan penarik. Silinder kerja ganda biasanya terbuat dari baja. Permukaan silinder juga dipoles dan dilapisi dengan kromium untuk mengurangi gesekan sehingga tidak mempengaruhi kinerja silinder. Katup pengaturan arah berfungsi untuk memastikan aliran udara antara lubang udara dengan cara membuka, menutup dan mengalihkan sambungan internal katup.



Gambar 2.2. Silinder Kerja Ganda

Penggolongan katup ditentukan oleh jumlah lubang, posisi alih, posisi normal katup dan metode operasi. Jenis-jenis katup pengaturan arah mencakup $2/2$, $3/2$, $5/2$, dan sebagainya. Nomor pertama merupakan jumlah lubang sedangkan angka kedua merupakan jumlah posisi silinder. Sebuah katup pengaturan arah yang memiliki dua posisi dan lima lubang ditunjukkan oleh **Gambar 2.3**.



Gambar 2.3. Simbol untuk Katup Pengaturan Arah $5/2$

Aturan penulisan simbol pneumatik yang distandarkan sesuai ISO-5599 ditunjukkan oleh Tabel 2.3.

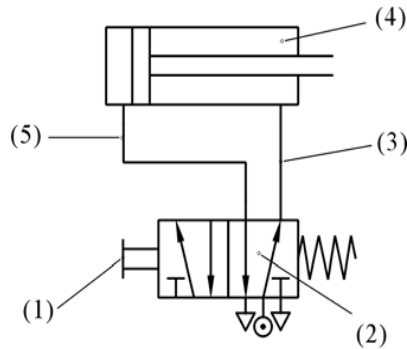
Tabel 2.3. Aturan Penulisan Simbol Pneumatik

<i>Port</i>	Sistem	Sistem Angka (ISO-
<i>Pressure</i>	P	1
<i>Working</i>	A	4
<i>Working</i>	B	2
<i>Exhaust</i>	R	5
<i>Exhaust</i>	S	3
<i>Pilot port</i>	Z	14
<i>Pilot port</i>	Y	12

Komponen selanjutnya yakni katup pengatur berfungsi untuk mengatur aliran udara. Berbeda dengan katup pengaturan arah, katup ini tidak memiliki aturan dalam penulisan lubang. Katup pengatur ini contohnya *non-return valve*, katup pengatur aliran, *shuttle valve*, dan lain sebagainya.

2.1.5 Desain Rangkaian Sistem Pneumatik

Semua komponen pneumatik utama dapat diwakili oleh simbol-simbol pneumatik sederhana. Setiap simbol menunjukkan hanya fungsi dari komponen yang diwakilinya, tetapi tidak strukturnya. Aturan penulisan sesuai dengan pembahasan sebelumnya pada Tabel 2.3. Simbol pneumatik dapat dikombinasikan untuk membentuk diagram pneumatik. Sebuah diagram pneumatik menggambarkan hubungan antara masing-masing komponen pneumatik, seperti silinder, katup pengatur arah, katup pengatur aliran, dan lain sebagainya. Rangkaian pneumatik memiliki fungsi sebagai pengatur injeksi dan pelepasan udara mampat dalam silinder serta untuk menggunakan satu katup untuk mengatur katup lain. Aturan dasar dalam penggambaran rangkaian pneumatik dijelaskan pada Gambar 2.4. Setiap nomor menjelaskan alur kerja dari sistem tersebut, yakni:

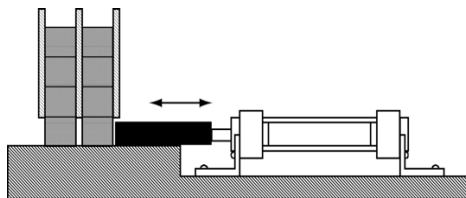


Gambar 2.4 Aturan Dasar Penggambaran Rangkaian Pneumatik

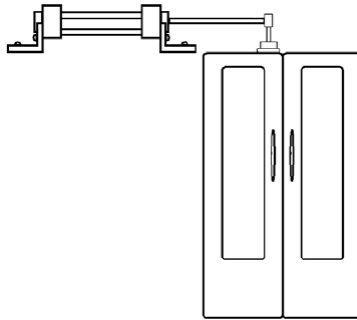
(1) Ketika saklar manual tidak dioperasikan, pegas akan mengembalikan katup ke posisi semula. (2) Dari posisi pegas, dapat disimpulkan bahwa blok tersebut beroperasi. Blok lainnya tidak akan beroperasi hingga saklar ditekan. (3) Tekanan udara ada di sepanjang lintasan ini karena terhubung dengan sumber udara mampat. (4) Rongga silinder dan batang piston berada di bawah pengaruh tekanan, sehingga batang piston kembali ke posisi awal. (5) Rongga silinder belakang dan garis ini tersambung ke pembuangan, dimana udara mampat dilepaskan.

2.1.6 Aplikasi Sistem Pneumatik

Sistem pneumatik dapat diaplikasikan dalam berbagai bidang, dalam Buku ini dibahas aplikasi sistem pneumatik di bidang industri dan transportasi. Gambar 2.5 menunjukkan sistem pengiriman barang sederhana pada industri percetakan. Saat tombol *on* ditekan, silinder akan mendorong salah satu barang dari rak barang ke konveyor. Saat tombol *on* dilepas, silinder akan mundur secara otomatis dan terus berulang.



Gambar 2.5. Sistem Pneumatik pada Industri Percetakan



Gambar 2.6. Sistem Pneumatik pada Pintu Bus

Sistem pneumatik juga bisa digunakan untuk mengoperasikan pintu kendaraan publik, dengan mengasumsikan buka dan tutup pintu diatur oleh dua tombol *on/off*. Saat tombol *on* ditekan, pintu akan terbuka sementara saat *off* ditekan pintu akan tertutup.

2.1.7 Prosedur Keamanan dalam Sistem Pneumatik

Dalam pemanfaatan sistem pneumatik, ada beberapa prosedur keamanan yang harus diperhatikan. Kelalaian dan pengabaian akan prosedur keamanan tersebut dapat menyebabkan kerugian secara materiil atau bahkan cedera dan kematian. Prosedur keamanan dijelaskan dalam Tabel 2.4

Tabel 2.4. Prosedur Keamanan Penggunaan Sistem Pneumatik

No.	Prosedur
1	Udara mampat dapat menyebabkan cedera serius pada tubuh manusia jika masuk ke dalam tubuh melalui saluran seperti rongga telinga dan mulut.
2	Jangan menyemprot udara mampat ke siapa pun.
3	Dalam suhu tinggi, udara mampat dapat menembus kulit manusia.
4	Udara mampat yang dilepaskan dari lubang pembuangan mengandung partikel dan tetesan minyak, yang dapat menyebabkan kerusakan pada mata.
5	Meskipun udara mampat dalam pipa/selang dan kompresor relatif rendah, ketika kompresor tidak dikendalikan dapat

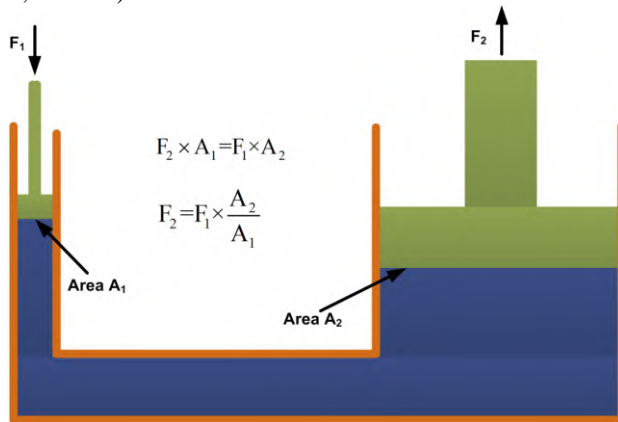
No.	Prosedur
	membahayakan nyawa manusia.
6	Sebelum menggunakan komponen suplai udara mampat, perlu diperiksa seluruh rangkaian apakah ada segel yang tidak rapat, tekanan abnormal atau pipa yang rusak.
7	Sebuah pipa yang tidak rapat sambungan dan segelnya dapat berguncang karena perubahan tekanan di dalamnya. Oleh karena itu, setiap kali sebelum tekanan pada sistem ditingkatkan, harus dilakukan pemeriksaan keseluruhan rangkaian untuk mencegah kecelakaan.
8	Gaya yang dihasilkan oleh silinder pneumatik relatif besar (jika tekanan yang diberikan besar pula), dan sangat cepat. Manusia dapat menderita luka serius jika tertabrak sebuah silinder.
9	Tombol saklar harus dipasang pada elemen suplai udara mampat untuk menyalakan/mematikan aliran udara secara mudah dan cepat.
10	Jika terjadi kebocoran, elemen suplai udara mampat harus dimatikan segera.
11	Elemen suplai udara mampat harus dimatikan sebelum melakukan perubahan pada sistem.
12	Jangan mendekati bagian yang sedang bergerak pada sistem.
13	Jangan memindahkan bagian yang bergerak pada katup operasi mekanis dengan tangan.

2.2 Sistem Hidrolik

2.2.1 Definisi Sistem Hidrolik

Sistem yang menggunakan fluida tertutup menggunakan cairan mampat sebagai media transmisi disebut sebagai sistem hidrolik. Sistem hidrolik bekerja pada prinsip hukum Pascal yang mengatakan bahwa tekanan dalam fluida tertutup seragam di semua arah. Sistem ini memiliki keuntungan dapat digunakan dalam lingkungan yang memiliki suhu tinggi dan menghasilkan gaya yang besar. Cairan mampat memiliki nilai bervariasi sesuai dengan kebutuhan dari pengguna. Untuk penggunaan di tingkat laboratorium sebesar 20-25 atm. Sedangkan penggunaan di bidang industri sebesar 40-50 atm[2]. Dalam kasus silinder kerja ganda, tekanan yang diberikan pada satu sisi akan menghasilkan tekanan yang meningkat di sisi lain secara proporsional dengan rasio silinder. Karena rasio silinder 1:1,7 dan tekanan kerja 60

bar (61,17 atm), dapat meningkatkan tekanan hingga lebih dari 100 bar (100,13 MPa).



Gambar 2.7 Prinsip Kerja Berdasarkan Hukum Pascal

Umumnya daya fluida membuat perubahan yang signifikan pada lingkungan sekitar. Aplikasi sistem hidrolik telah menghasilkan rancangan baru dan peningkatan efisiensi bagi mesin. Penggunaan fluida bertekanan untuk menyalurkan daya dan mengatur pergerakan tertentu merupakan teknologi yang modern dan telah berkembang pesat dalam waktu dua hingga tiga dekade terakhir. Hidrolik pada industri dapat bergerak dengan cepat di satu sisi dan melambat di sisi lain. Tidak ada medium lain yang dapat menyamai tingkat akurasi, fleksibilitas, dan memiliki kemampuan untuk menyalurkan daya maksimum dalam berat dan jumlah komponen yang minimum.

Pengaturan gerakan tiap komponen merupakan kebutuhan umum dalam dunia industri. Proses ini dilakukan menggunakan mesin listrik atau diesel, bensin dan mesin uap sebagai penggerak utama. Penggerak utama dapat menghasilkan berbagai gerakan pada objek dengan menggunakan beberapa komponen mekanik seperti sekrup *jack*, tuas, rak dan sebagainya. Fluida (cairan maupun gas) yang dimampatkan juga dapat digunakan sebagai penggerak utama menghasilkan gerak dan gaya untuk benda.

2.2.2 Karakteristik Fluida pada Sistem Hidrolik

Fungsi utama fluida dalam sistem daya fluida adalah menyalurkan energi. Terdapat pertimbangan praktis untuk menentukan cairan khusus yang digunakan dalam sistem hidrolik. Cairan harus mampu mendinginkan sistem melalui disipasi panas dalam radiator atau *reservoir*, dapat melakukan penyegelan untuk mencegah kebocoran, harus melumasi permukaan yang berputar dan bergeser seperti di motor dan silinder, tidak menimbulkan korosi pada komponen dan harus memiliki *lifetime* yang panjang tanpa mengalami kerusakan secara kimiawi. Sistem hidrolik pada awalnya menggunakan air sebagai fluida sistem karena aman bagi manusia dan lingkungan, murah dan tersedia secara luas, namun memiliki kelemahan yang signifikan untuk aplikasi hidrolik. Air tidak dapat melakukan pelumasan, memiliki viskositas rendah dan kebocoran pada segel, mengalami kavitasi ketika tekanan fluida bernilai negatif, memiliki jangkauan suhu pendek antara titik beku dan didih (0 sampai 100° C), sifat korosif yang tinggi pada baja dan besi. Kelemahan tersebut menyebabkan saat ini fluida pada sistem hidrolik menggunakan minyak bumi dengan bahan dasar minyak, ditambah zat aditif agar tidak berbusa dan terjadi korosi. Minyak bumi memiliki biaya murah, dapat melakukan pelumasan yang baik dan tahan lama. Contohnya yaitu cairan yang digunakan pada rem dan gigi.

2.2.3 Keuntungan dan Kerugian Sistem Hidrolik

Sistem yang menggunakan fluida memiliki kerugian dan keuntungan. Sistem hidrolik ini ditunjukkan pada Tabel 2.5

Tabel 2.5 Keuntungan dan Kerugian Penggunaan Sistem Hidrolik

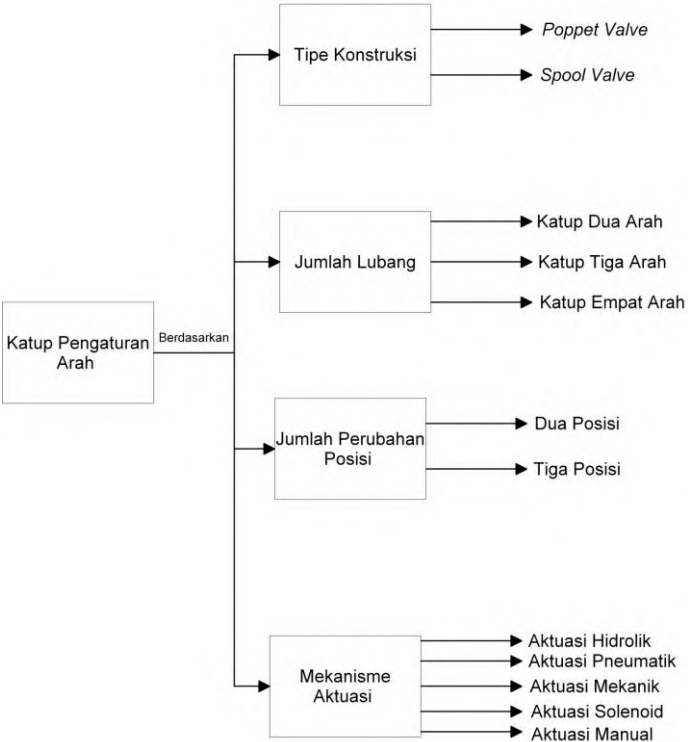
No.	Keuntungan	Kerugian
1	Sistem hidrolik menggunakan fluida yang dimampatkan jadi dapat menghasilkan efisiensi tinggi.	Bahan pembuat tempat penyimpanan, pipa atau selang, silinder dan piston dapat mengalami korosi karena fluida. Sehingga harus melakukan pertimbangan yang cermat dalam

No.	Keuntungan	Kerugian
		pemilihan bahan dan fluida.
2	Sistem menghasilkan daya keluaran yang konstan.	Struktur dan berat sistem lebih besar dari sistem lain sehingga tidak cocok untuk peralatan yang kecil.
3	Biaya perawatan lebih murah karena peralatan tahan lama.	Sedikit ketidakjernihan dalam fluida dapat merusak sistem secara permanen, sehingga harus memilih penyaring yang sesuai.
4	Bekerja dengan baik dalam lingkungan yang panas.	Fluida hasil pembuangan yang tidak ditangani dengan baik dapat berbahaya bagi lingkungan.

2.2.4 Komponen Penyusun Sistem Hidrolik

Sistem hidrolik terdiri dari komponen penyusun yang memiliki fungsi berbeda. Komponen ini termasuk tangki penyimpanan, *filter*, pompa hidrolik, *pressure regulator*, katup pengatur, silinder hidrolik, piston and pipa anti bocor. Pompa hidrolik dibedakan menjadi dua kategori : *Non-positive displacement pumps* dan *positive displacement pumps*. *Non-Positive Displacement Pumps* dikenal juga dengan nama pompa hidrodinamik. Pada pompa ini fluida dimampatkan oleh perputaran baling-baling dan besarnya tekanan fluida proporsional dengan kecepatan rotor. Pompa ini tidak dapat menahan tekanan tinggi dan secara umum digunakan pada sistem dengan tekanan yang rendah serta volume aliran tinggi. Keuntungan penggunaan *non-positive displacement pumps* adalah biaya yang murah, pemeliharaan operasi tidak banyak karena jumlah komponen yang bergerak hanya sedikit, kesederhanaan operasi, keandalan yang tinggi dan kesesuaian penggunaan dengan berbagai cairan. Pompa ini digunakan untuk menyalurkan cairan pada industri yang menggunakan tenaga hidrolik. Pompa sentrifugal adalah contoh umum dari *non-positive displacement pumps*.

Positive displacement pump berfungsi untuk mengirimkan volume cairan yang bernilai konstan. Kuantitas debit per revolusi bernilai tetap di pompa ini dan menghasilkan aliran fluida yang proporsional untuk perpindahan dan kecepatan rotor. Pompa ini digunakan di sebagian besar industri yang menggunakan tenaga fluida. Keuntungan penggunaan pompa ini adalah daerah yang memiliki tekanan tinggi dan tekanan rendah (berarti daerah masukan dan keluaran) dipisahkan sehingga cairan tidak bisa bocor karena tekanan tinggi di saluran keluar.



Gambar 2.8. Klasifikasi Katup Pengatur Arah

Fitur-fitur ini membuat *positive displacement pump* yang paling cocok dan diterima secara universal untuk sistem hidrolik. Keuntungan lain

yakni kemampuan untuk menghasilkan tekanan tinggi, efisiensi volumetrik yang tinggi, menghasilkan daya tinggi, tekanan rentang operasi kecil dan lebih luas serta cepat. Laju aliran fluida dari pompa ini berkisar dari 0,1 dan 15.000 gpm, tekanan berkisar antara 10 dan 100.000 psi dan kecepatan putar kurang dari 500 rpm. Hal ini menunjukkan bahwa *positive displacement pump* tidak hanya menghasilkan tekanan tetapi juga aliran fluida. Contoh *positive displacement pump* secara umum adalah *pump gear*, baling-baling pompa dan pompa piston.

Katup pengatur arah digunakan untuk mengatur distribusi energi dalam sistem tenaga fluida. Katup ini mengarahkan cairan untuk mengalir pada arah tertentu. Katup ini digunakan untuk mengendalikan saat awal fluida bergerak, berhenti dan perubahan arah dari aliran fluida. Katup ini mengatur arah aliran pada rangkaian hidrolik. Katup pengatur arah ini memiliki lubang bukaan eksternal untuk cairan masuk dan keluar. Jumlah lubang biasanya diidentifikasi dengan istilah 'jalan'. Sebagai contoh, sebuah katup dengan empat lubang disebut juga katup empat arah. Laju aliran fluida berfungsi untuk mengatur kecepatan aktuator (gerak keluaran) dan harus diatur dalam sistem hidrolik. Proses ini dapat dilakukan dengan menggunakan katup pengatur aliran. Tekanan dapat ditingkatkan secara bertahap ketika sistem sedang berjalan. Katup pengatur tekanan melindungi sistem dengan mempertahankan tekanan sistem sesuai nilai yang diinginkan. Katup pengatur arah dapat diklasifikasikan seperti pada Gambar 2.8.

2.2.5 Aplikasi Sistem Hidrolik

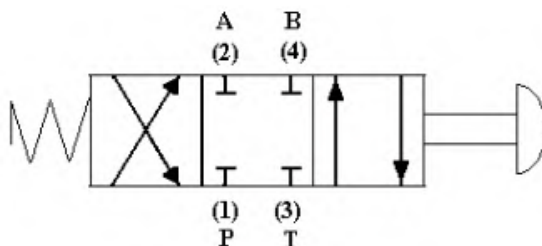
Sistem hidrolik digunakan untuk pengaturan presisi yang membutuhkan gaya besar. Penggunaan sistem hidrolik ditunjukkan seperti pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Aplikasi Sistem Hidrolik dalam Berbagai Bidang

No.	Bidang	Kegunaan
1	Industri	Mesin pengolahan plastik, pembuatan baja dan ekstraksi logam utama, industri kertas, tekstil, peremukkan mesin bekas dan sistem

No.	Bidang	Kegunaan
		robot.
2	<i>Mobile</i>	Traktor, sistem irigasi, peralatan penanganan material, kendaraan komersil, peralatan pembuat terowongan, mesin bangunan dan konstruksi dan perlengkapan bor.
3	<i>Automobiles</i>	Rem, sok breker, <i>steering system</i> , dan penahan angin pada kendaraan.
4	Kelautan	Kapal pemancing dan peralatan berlayar.
5	<i>Aerospace</i>	Kontrol kemudi, roda saat pendaratan, rem, kontrol penerbangan dan transmisi yang digunakan dalam pesawat terbang, roket dan pesawat ruang angkasa.

2.2.6 Desain Rangkaian Sistem Hidrolik



Gambar 2.9 Katup 4/3 pada Rangkaian Hidrolik

Penggambaran komponen hidrolik hampir sama dengan simbol-simbol pneumatik. Perbedaan yang mendasar adalah pada lubang pembuangan sistem hidrolik disimbolkan dengan huruf T (*Tank*). Aturan penulisan dapat dilihat pada Tabel 2.7. Sedangkan untuk penggambaran

salah satu katup yang digunakan pada sistem hidrolik seperti pada Gambar 2.9.

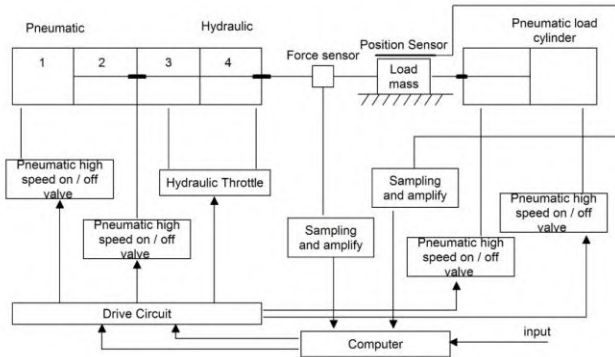
Tabel 2.7 Aturan Penulisan Simbol pada Rangkaian Hidrolik

<i>Port</i>	Sistem huruf	Sistem Angka (ISO-5599)
<i>Pressure</i>	P	1
<i>Working</i>	A	4
<i>Working</i>	B	2
<i>Exhaust</i>	T	3
<i>Pilot port</i>	Z	14
<i>Pilot port</i>	Y	12

2.3 Sistem PHCC

2.3.1 Deskripsi Sistem PHCC

Sistem yang merupakan kombinasi antara pneumatik dan hidrolik dinamakan PHCC. Sistem ini terdiri dari sebuah silinder pneumatik-hidrolik, katup solenoid *on/off* 3/2, beban, sensor posisi, serta sensor gaya seperti pada Gambar 2.10. Alur kerja sistem ini dimulai dengan perintah dari pengguna melalui komputer yang diterjemahkan oleh rangkaian penggerak untuk mengatur katup solenoid. Silinder pneumatik-hidrolik yang digerakkan oleh katup akan mendorong beban. Di saat yang bersamaan, sebuah silinder beban pneumatik berfungsi untuk menahan pergerakan beban akibat dorongan silinder pneumatik-hidrolik bergerak ke arah yang berlawanan. Gaya yang diberikan pada silinder untuk mendorong beban berbanding lurus dengan posisi beban yang bergeser. Pergeseran ini yang akan terbaca oleh sensor posisi[1]. Mekanisme pergeseran beban pada sistem ini disebut juga *tracking* posisi, di mana nilai kesalahan yang terbaca merupakan selisih posisi yang diinginkan dari dorongan silinder pneumatik-hidrolik dan posisi saat ini setelah silinder beban pneumatik menahan beban. Pembebanan yang diberikan pada saat menahan



Gambar 2.10. Diagram Fisik Sistem PHCC

2.3.2 Silinder Pneumatik-Hidrolik

Silinder ini merupakan komponen utama pada sistem PHCC. Silinder ini merupakan kombinasi dari silinder pneumatik dan silinder hidrolik. Pada, sistem pneumatik berperan sebagai komponen penggerak utama. Silinder pneumatik akan bergerak sehingga pompa hidrolik teraktuasi. Setelah pompa hidrolik mendapat gaya penggerak, maka fluida akan bertindak sebagai media penggerak sistem dan silinder hidrolik dapat teraktuasi. Gambar 2.11 merupakan bentuk fisik dari *pneumatic-hydraulic cylinder*.



Gambar 2.11. Silinder Pneumatik-Hidrolik

2.4 Sliding Mode Control

Sliding Mode Controller (SMC) merupakan sebuah kendali umpan balik pensaklaran berkecepatan tinggi (*high speed switching feedback control*) yang efektif dan kokoh dalam mengendalikan sistem linear

maupun non-linear. Konsep *Sliding Mode Control* menyatakan bahwa trayektori dari titik sembarang pada bidang fasa akan menuju ke *sliding surface*. Trayektori akan meluncur pada *sliding surface*, menuju origin pada bidang fasa. *Switching line* akan terbentuk di sekitar *sliding surface* dan hanya memiliki nilai maksimum serta minimum. Kondisi yang terjadi pada saat trayektori bergerak pada *switching line* dinamakan dengan *sliding mode*. Agar tidak keluar dari *sliding surface* dan tetap berada pada rentang *switching line*, dibutuhkan sebuah fungsi kontrol.

2.4.1 *Sliding Surface*

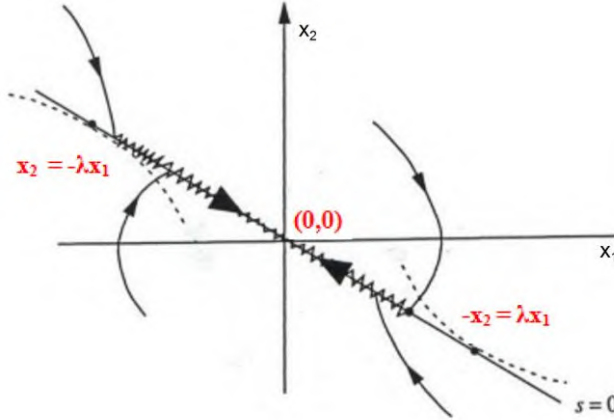
Merupakan tempat dimana trayektori yang memiliki nilai sembarang pada sistem akan bergerak. Setelah berada pada *sliding surface*, maka trayektori akan tetap bergerak hingga menuju titik origin. *Sliding surface* dinotasikan dengan s . Untuk menentukan *sliding surface* pada suatu sistem, dapat dicari dengan menggunakan Persamaan (2.1),

$$s(x,t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} \tilde{x} \quad (2.1)$$

Untuk λ , n , \tilde{x} secara berurutan merupakan konstanta positif, derajat relatif antara input dan output, dan eror dari sistem. Pemilihan λ berdasarkan spesifikasi desain yang diinginkan, dengan syarat $\lambda > 0$. Aturan ini mutlak diperlukan sebab. Sementara itu parameter integer n harus bernilai $n - 1$. Parameter \tilde{x} untuk sistem *tracking* posisi merupakan selisih dari posisi yang diinginkan dengan posisi yang terukur. Penggambaran *sliding surface* dapat menggunakan analisa bidang fasa. Pada keadaan ideal, titik kesetimbangan sistem dianggap berada pada titik (0,0) dan $s = 0$ yang disebutkan dalam Persamaan (2.2).

$$\begin{aligned} s &= x_2 + \lambda x_1, \\ 0 &= x_2 + \lambda x_1, \\ x_2 &= -\lambda x_1 \\ \text{atau,} \\ -x_2 &= \lambda x_1 \end{aligned} \quad (2.2)$$

Dimana x_1 , melambangkan kesalahan dari posisi silinder, dan x_2 , melambangkan kesalahan dari kecepatan silinder. Pergerakan silinder dengan nilai posisi yang bervariasi akan menuju ke referensi melalui *sliding surface(s)* dapat dilihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12. Trayektori Bergerak ke *Sliding Surface*

2.4.2 Control Law

Fungsi kontrol ini menyebabkan trayektori tetap berada pada *sliding surface*. *Control law* terdiri dari dua bagian. Bagian pertama, u_{eq} (u ekivalen), adalah bagian kontinyu dan bagian kedua, u_n (u natural), adalah bagian diskontinyu. *Control law* dapat dinyatakan dalam Persamaan (2.3)

$$u = u_{eq} + u_n \quad (2.3)$$

Fungsi u ekivalen menyebabkan trayektori dengan nilai awal sembarang bergerak menuju *sliding surface*. Fungsi ini disebut kontinyu karena nilainya berubah sesuai dengan fungsi waktu. Fungsi u ekivalen menyebabkan sebuah trayektori tetap berada pada *sliding surface* meskipun parameter sistem bervariasi dan diberikan gangguan eksternal dalam jangka waktu tertentu. Fungsi ini disebut bagian diskontinyu karena nilainya berubah sesaat setelah mencapai nilai maksimum atau minimum. Fungsi kontrol natural dapat dinyatakan dalam Persamaan (2.4)

$$u = \begin{cases} k \operatorname{sgn}(s) & \sigma < 0 \\ -k \operatorname{sgn}(s) & \sigma > 0 \end{cases} \quad (2.4)$$

Dimana k adalah konstanta dan fungsi $\operatorname{sgn}(\text{signum})$ digunakan sebagai pembatas saat terjadi diskontinuitas pada *sliding surface*.

2.5 Kestabilan Lyapunov[6]

Pada tahun 1892, Aleksandr Mikhailovich Lyapunov mengemukakan dua metode untuk menentukan kestabilan dari sistem dinamik yang dideskripsikan dalam bentuk ODE(*ordinary differential equation*). Lyapunov menyatakan konsep kestabilan ini dalam dua metode, yakni *first* dan *second method*. Metode pertama Lyapunov disebut juga *Lyapunov's indirect method*. Metode ini disebut juga metode linierisasi dimana persamaan differensial dari sistem diselesaikan dan kestabilan ditentukan dari solusinya

2.5.1 *Second Method of Lyapunov*[6]

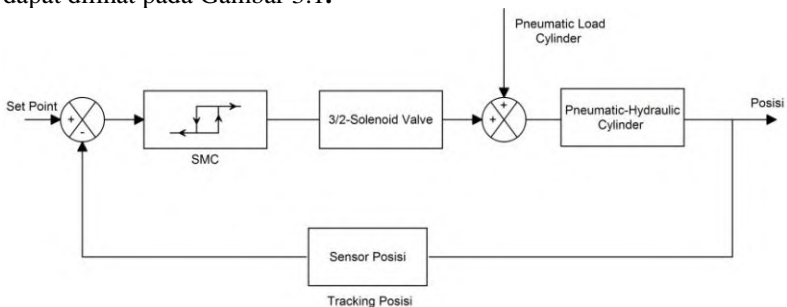
Metode ini disebut juga *direct method* karena kestabilan sistem ditentukan tanpa penyelesaian persamaan differensial, tetapi berdasarkan energi yang tersimpan baik energi kinetik maupun potensial. Konsep dari metode ini adalah jika sistem memiliki titik kesetimbangan yang stabil asimptot maka energi yang tersimpan pada sistem dipindahkan dalam domain seiring berjalannya waktu hingga diasumsikan nilai minimumnya berada pada titik kesetimbangan. Secara matematis tidak ada cara untuk mendefinisikan “fungsi energi” ini. Untuk menyelesaikan permasalahan ini Lyapunov membuat suatu fungsi yang dinamakan **fungsi Lyapunov**. Fungsi Lyapunov bergantung kepada *state* x_1, x_2, \dots, x_n dan t serta dapat disederhanakan untuk penulisan matematis dengan menggunakan simbol $\mathbf{V}(\mathbf{x}, t)$. Karakteristik dari $\mathbf{V}(\mathbf{x}, t)$ dan turunan pertamanya $dV(\mathbf{x}, t)/dt$ menunjukkan kestabilan dari sebuah titik kesetimbangan.

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

BAB III PERANCANGAN SISTEM

3.1 *Sliding Mode Controller*

Pada dasarnya SMC adalah kontrol umpan balik peralihan kecepatan tinggi. Metode ini memiliki aksi kontrol diskontinyu, di mana perubahan tersebut terjadi pada saat trayektori berada pada *sliding surface*. Pada sebagian besar perancangan SMC, penggunaan konstanta gain tidak dapat diabaikan untuk menjaga stabilitas sistem. Namun, hal ini menyebabkan masalah baru yakni *chattering*, di mana pada kondisi ini sistem akan berubah dalam waktu yang singkat. Problem ini menyebabkan akurasi kontrol pada sistem menurun. Kontroler ini memanfaatkan prinsip diskontinuitas agar *state* trayektori sistem menuju ke *sliding surface* sehingga sistem memiliki karakteristik yang diinginkan, contohnya kestabilan, *disturbance rejection capability*, *tracking* dan sebagainya. Secara umum, perancangan SMC terdiri dari dua tahap yakni perancangan *sliding surface* dan pemilihan *control law* yang sesuai. Diagram blok untuk sistem PHCC dengan kontroler SMC dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Diagram Blok Sistem PHCC dengan SMC

3.2 *Penentuan Sliding Surface*[1]

Untuk melakukan sistem pengaturan posisi pada PHCC dibutuhkan *sliding surface* yang sesuai dengan spesifikasi kesalahan sistem. Tujuan perancangan ini adalah agar *state* x dapat melakukan *tracking* posisi silinder sehingga nilai $e \approx 0$. Persamaan kesalahan posisi dapat dinyatakan,

$$e = \tilde{x} = x - x_d \quad (3.1)$$

Dengan melakukan substitusi Persamaan (3.1) pada Persamaan (2.2), rumus penentuan *sliding surface* untuk sistem PHCC dinyatakan dalam Persamaan (3.2)

$$s(x, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} \tilde{x} \quad (3.2)$$

Di mana λ dan n berurutan adalah parameter *sliding mode* dan derajat relatif sistem. Derajat relatif pada sistem adalah 2, yang menunjukkan orde dari sistem. Diketahui orde sistem adalah 2 seperti ditunjukkan pada Persamaan (3.7), maka

$$\begin{aligned} s(x, t) &= \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{2-1} \tilde{x} \\ s(x, t) &= \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right) \tilde{x} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Persamaan (3.1) disubstitusi ke Persamaan (3.3), sehingga didapatkan

$$\begin{aligned} s(x, t) &= \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right) (x - x_d) \\ s(x, t) &= \left(\frac{d}{dt} (x) - \frac{d}{dt} (x_d) + \lambda x - \lambda x_d \right) \\ s(x, t) &= (\dot{x} - \dot{x}_d) + \lambda (x - x_d) \end{aligned} \quad (3.4)$$

Dengan mendefinisikan $x_2 = \dot{x}_1$, $x_{2d} = \dot{x}_{1d}$ dan x_1 , x_{1d} secara berurutan adalah posisi yang terukur serta posisi yang diinginkan. Didapat *sliding surface* untuk sistem PHCC pada penelitian ini dengan melakukan substitusi ke Persamaan (3.4) yang dinyatakan dalam Persamaan (3.5)

$$s(x, t) = (x_2 - x_{2d}) + \lambda (x_1 - x_{1d}) \quad (3.5)$$

3.3 Penentuan *Control Law*[2]

Persamaan sistem dapat dinyatakan pada Persamaan (3.6)

$$\dot{x} = f(x) + B(x)u \quad (3.6)$$

Persamaan *state* silinder pneumatik-hidrolik untuk posisi dan kecepatan dapat ditulis dalam persamaan matematis seperti pada Persamaan (3.7)

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= x_3 - \frac{(K_h + b_L)x_2 + (K_L)x_1 - F_L}{m} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Untuk menentukan *control law* maka harus mempertimbangkan pemilihan kandidat fungsi Lyapunov. Berdasarkan dari Persamaan (2.2) ditentukan untuk kandidat Lyapunov pada Persamaan (3.8),

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (3.8)$$

Dimana V fungsi Lyapunov definit positif dan dV/dt merupakan fungsi definit negatif, sehingga kestabilan asimptot dapat tercapai.

$$\dot{V} = s\dot{s} < 0 \quad (3.9)$$

Dengan menggunakan Persamaan (3.9), maka dapat dirancang sebuah fungsi kontrol untuk mencapai kestabilan dari sistem.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} \\ &= s(\ddot{e} + \lambda\dot{e}) \\ &= s(\ddot{x} - \ddot{x}_d + \lambda\dot{e}) \\ &= s(\ddot{x} - (f(x, \dot{x}) + bu) + \lambda\dot{e}) \\ &= s\ddot{x} - sf(x, \dot{x}) - sbu + s\lambda\dot{e} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Agar dV/dt bernilai negatif, u dapat dibagi menjadi tiga kontroler parsial yang dijabarkan menjadi seperti pada Persamaan (3.11)

$$\begin{aligned}\dot{V} &= s\ddot{x} - sf(x, \dot{x}) - sb(u_1 + u_2 + u_3) + s\lambda\dot{e} \\ &= (s\ddot{x} - sbu_1) + (-sf(x, \dot{x}) - sbu_2) + (s\lambda\dot{e} - sbu_3)\end{aligned}\quad (3.11)$$

Kontroler *sliding mode* secara keseluruhan dapat diketahui dengan menjumlahkan u_1 , u_2 , dan u_3 dalam Persamaan (3.12)

$$u = \text{sgn}(s)b^{-1}(\ddot{x} - f(x, \dot{x}) + \lambda\dot{e}) \quad (3.12)$$

Dari Persamaan (3.12) dapat diketahui fungsi kontrol ekivalen pada Persamaan (3.13),

$$u_{eq} = b^{-1}[\ddot{x} - f(x, \dot{x}) + \lambda\dot{e}] \quad (3.13)$$

Fungsi kontrol u natural merupakan komponen diskontinyu yang dapat mengkompensasi parameter yang berubah dan efek dari gangguan. Untuk memenuhi *sliding mode condition* dan *reaching condition*, k dapat bernilai positif dengan nilai berapapun. Karena komponen diskontinyu inilah, *chattering problem* tidak dapat dihindari. Fungsi kontrol ini dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan (2.4). Dimana k adalah konstanta positif. Sehingga didapatkan fungsi kontrol u natural seperti pada Persamaan (3.14)

$$u_n = \begin{cases} -k \text{sgn}(s) & s\dot{s} \leq 0 \\ k \text{sgn}(s) & s\dot{s} > 0 \end{cases} \quad (3.14)$$

Berdasarkan dari perancangan *control law* yang telah dilakukan, didapatkan *control law* dengan batasan, pada Persamaan (3.15) dan Persamaan (3.16)

$$u = u_{eq} + u_n \quad (3.15)$$

$$u = \frac{1}{m} \text{sgn}(s) \left(\ddot{x} - \frac{(K_h + b_L)x_2 + (K_L)x_1}{V_{20}m} + \lambda\dot{e} \right) \quad (3.16)$$

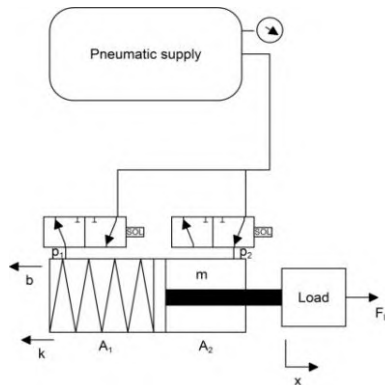
3.4 Pemodelan *Plant*[8]

Dasar dari sistem PHCC merupakan sistem pneumatik, sedangkan sistem hidrolik merupakan bagian kombinasi untuk mengurangi kelemahan yang terjadi pada sistem hidrolik. Maka pemodelan sistem ini didasarkan dari sistem pneumatik yang terdiri dari *pneumatic supply*, katup solenoid *on/off*, dan silinder kerja ganda. Untuk melakukan pemodelan berdasarkan hukum Newton II, maka perlu dicari gaya yang bekerja pada sistem. Gaya yang bekerja adalah posisi, kecepatan, dan percepatan. Pada silinder kerja ganda, terdapat pegas sebagai mekanisme agar batang silinder dapat kembali secara otomatis. Peredam berfungsi untuk mengurangi guncangan dan getaran pada silinder. Didapatkan komponen penyusun gaya-gaya yang bekerja pada sistem pneumatik. Hubungan antara komponen pegas, peredam, dan massa silinder terhadap posisi, kecepatan, serta massa beban ditunjukkan pada Persamaan (3.22)

Dalam melakukan pemodelan, parameter yang ada pada sistem ditentukan berdasarkan standar industri ataupun standar internasional jika berhubungan dengan variabel natural. Parameter yang digunakan sebagai acuan untuk pemodelan dan simulasi sistem PHCC disebutkan dalam Tabel 3.1.

Tabel 3.1. Parameter pada Sistem PHCC[2]

Simbol	Keterangan	Besaran
K_h	Konstanta damping cairan	1
K_L	Koefisien elastisitas	1
F_L	Gaya beban	berubah
b_L	Koefisien kekentalan	1
k	Rasio panas	1,4
R	Konstanta gas universal	287 J/Kg K^{-1}
T	Temperatur pada silinder	298 K
q_{m1}	Aliran massa ke ruang 1	1
q_{m2}	Aliran massa ke ruang 2	1
V_{10}	Volume ruang 1	150 cm^3
V_{20}	Volume ruang 2	100 cm^3
A_1	Luas kerja efektif ruang 1	50 cm^2
A_2	Luas kerja efektif ruang 2	40 cm^2



Gambar 3.2. *Free Body Diagram* Sistem Pneumatik[9]

Pemodelan dilakukan berdasarkan dinamika pada silinder pneumatik. Dalam melakukan pemodelan *plant*, terdapat tiga hukum fisik yang digunakan sebagai acuan. Hukum pertama adalah hukum Pascal, yang menyebutkan bahwa tekanan (P) pada suatu bidang kerja sama dengan gaya (F) dibagi dengan luas bidang (A). Hukum Pascal dinyatakan dalam Persamaan (3.17)

$$P = F / A \quad (3.17)$$

Hukum kedua adalah hukum gas ideal yang dinyatakan dalam Persamaan (3.18). Hukum gas ideal adalah keadaan beberapa gas pada kondisi tertentu yang direpresentasikan sebagai kombinasi dari Hukum Boyle dan Hukum Charles

$$P V = n R T \quad (3.18)$$

Di mana P adalah tekanan mutlak gas, V adalah Volume, n adalah jumlah partikel pada gas (dalam mol), T adalah temperatur dalam satuan Kelvin, dan R adalah konstanta gas ideal, yaitu 0,08205 L atm/mol K. Hukum ketiga adalah hukum Newton II yang menyebutkan bahwa jumlah gaya yang bekerja pada sistem (ΣF) sama dengan massa benda (m) dikali dengan percepatan benda (a). Hukum Newton II dinyatakan dalam Persamaan (3.19)

$$\Sigma F = m a \quad (3.19)$$

Pada penelitian sebelumnya mengenai sistem pneumatik[9], *state vector* dirancang seperti pada Persamaan (3.20)

$$X = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ P_1 \\ P_2 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Dimana x , \dot{x} , P_1 , dan P_2 secara berurutan adalah posisi silinder, kecepatan silinder, tekanan di ruang 1 serta tekanan di ruang 2. Persamaan (3.20) dapat dikembangkan sehingga menjadi Persamaan (3.21)

$$Z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \frac{P_1 A_1 - P_2 A_2}{m} \\ P_2 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

State z_3 merupakan penjabaran nilai percepatan pada silinder. Dengan menggunakan Persamaan (3.19), diketahui $a = F / m$. Sementara F bisa didapatkan dari Persamaan (3.17). Pada Persamaan (3.21) diketahui bahwa $\dot{z}_1 = z_2$, $\dot{z}_2 = z_3 - \dot{z}_1$, $\dot{z}_3 = P_1$, dan $\dot{z}_4 = P_2$. Untuk mendapatkan z_3 , maka dilakukan penjabaran dari *Free Body Diagram* silinder pneumatik pada Gambar 2.5 menggunakan Persamaan (3.19),

$$\Sigma F = m a$$

$$\Sigma F = kx + b\dot{x} + m\ddot{x}$$

$$F_c + F_L = kx + b\dot{x} + m\ddot{x}$$

$$m\ddot{x} = F_c + F_L - kx - b\dot{x}$$

$$\ddot{x} = \frac{F_c + F_L - kx - b\dot{x}}{m} \quad (3.22)$$

Dimana k , b , \ddot{x} , dan F_L secara berurutan adalah konstanta pegas, koefisien redaman, percepatan silinder serta gaya yang dihasilkan antara beban dan massa. F_c adalah gaya pada silinder yang ditunjukkan oleh *state* z_3 pada Persamaan (3.21). Sedangkan untuk mendapatkan z_4 dengan menggunakan Persamaan (3.18) diperoleh

$$PV = nRT$$

$$\dot{P}_1 V_1 + P_1 \dot{V}_1 k = nRT$$

$$\dot{P}_1 V_1 = nRT - P_1 \dot{V}_1$$

$$\dot{P}_1 = k \frac{RTq_{m1} - P_1 \dot{V}_1}{V_1} \quad (3.23)$$

$$\dot{P}_2 V_2 - P_2 \dot{V}_2 k = nRT$$

$$\dot{P}_2 V_2 = nRT + P_2 \dot{V}_2$$

$$\dot{P}_2 = k \frac{RTq_{m2} + P_2 \dot{V}_2}{V_2} \quad (2.24)$$

Maka, setelah didapatkan keseluruhan variabel *state*, model *plant* dalam bentuk persamaan matematis ditunjukkan seperti pada Persamaan (3.25). Terdapat empat *state variabel* yang menunjukkan karakteristik dari sistem.

$$\begin{aligned}
\dot{z}_1 &= z_2 \\
\dot{z}_2 &= z_3 \\
\dot{z}_3 &= -\frac{k(A_2^2 z_4 z_2 + A_2 RT q_{m2})}{m(V_{20} - A_2 z_1)} - \frac{k(A_1 z_2 z_3 + A_1 RT q_{m1})}{m(V_{10} + A_1 z_1)} \\
\dot{z}_4 &= \frac{k(A_2^2 z_4 z_2 - A_2 RT q_{m2})}{m(V_{10} - A_2 z_1)}
\end{aligned} \tag{3.25}$$

Persamaan (3.25) dapat dibentuk dalam persamaan *state* Z seperti pada Persamaan (3.26). *State* z_1 menunjukkan kecepatan silinder, sementara z_2 adalah posisi silinder, kemudian *state* z_3 menunjukkan tekanan pada ruang 1 yakni ruangan silinder pneumatik dan z_4 adalah tekanan pada ruang 2 yakni ruangan silinder hidrolik. *State* z_1 dan z_2 digunakan untuk menentukan *control law*.

$$Z = \begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \\ \dot{z}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_2 \\ z_3 - \frac{((K_h + b_L) z_2 + K_L z_1) + F_L}{m} \\ -\frac{k(A_2 z_4 z_2 + A_2 RT q_{m2})}{m(V_{20} - A_2 z_1)} - \frac{k(A_1 z_2 z_3 + A_1 RT q_{m1})}{m(V_{10} + A_1 z_1)} \\ \frac{k(A_2^2 z_4 z_2 - A_2 RT q_{m2})}{m(V_{20} - A_2 z_1)} \end{bmatrix} \tag{3.26}$$

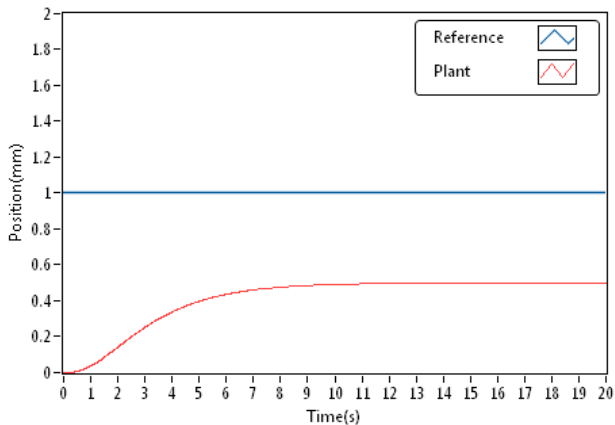
-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISA

Pengujian dari hasil perancangan kontroler dengan cara membandingkan respon sistem saat simulasi, yaitu *plant* dengan SMC melakukan *tracking* terhadap sinyal referensi. Analisa dilakukan setelah dilakukan pengujian.

4.1 Respon *Open Loop* Sistem PHCC Tanpa Kontroler

Dari respon *open loop* pada Gambar 4.1 terlihat bahwa keadaan tunak untuk respon pada silinder yaitu sebesar 0,5 dan memiliki nilai kesalahan sebesar 50% dengan diberikan sinyal referensi sebesar 1. Diperlukan suatu kontroler yang mampu menjaga kestabilan dan performansi sistem. Kriteria performansi yang diharapkan dalam penelitian ini diantaranya *rise time* yang cepat <11,3 detik, kesalahan waktu tunak 0, serta tidak muncul *chattering*, agar diperoleh respon yang stabil.



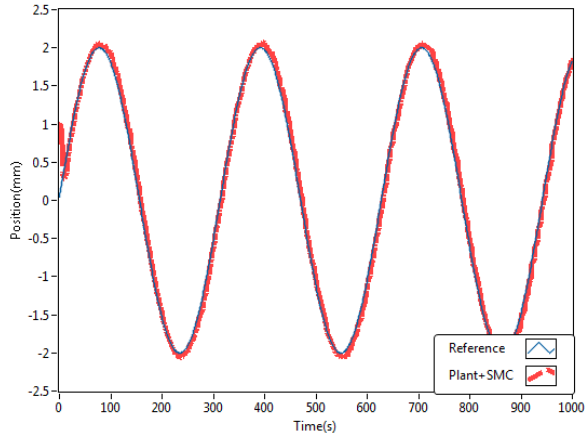
Gambar 4.1. Respon *Open Loop* Sistem PHCC

4.2 Pengujian dengan Perubahan Parameter *Sliding Mode*

4.2.1 Performansi *Tracking*

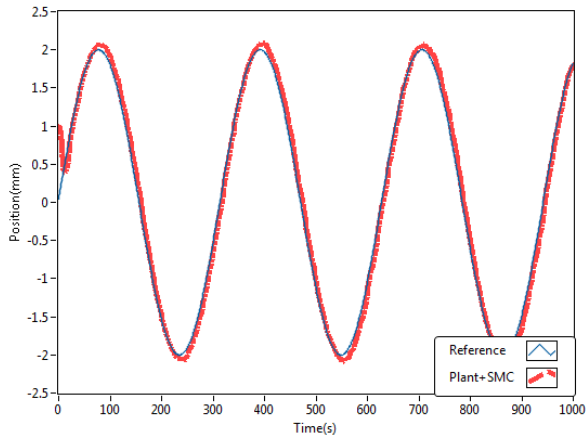
Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan sinyal sinus. Hal yang harus diperhatikan dalam pengujian adalah parameter yang akan diubah meliputi λ (parameter *sliding mode*). Pengujian yang dilakukan melalui simulasi ini dilakukan melalui perubahan untuk parameter

sliding mode yakni 0, 5, 20, 35 dan 50 lalu menganalisa perubahan kecepatan serta *tracking* posisi silinder terhadap sinyal referensi. Pengujian dihentikan saat didapatkan data mengenai parameter yang dapat mempengaruhi *tracking* posisi.



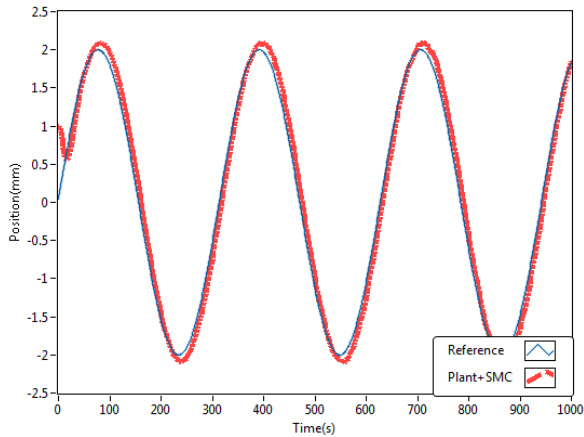
Gambar 4.2. *Tracking* Sinyal Referensi saat $\lambda = 50$

Dengan melakukan pengaturan nilai referensi 0 mm, jarak maksimal silinder untuk aktuasi adalah 2 mm dan minimal silinder adalah -2 mm. Artinya, keadaan awal silinder berada di tengah posisi aktuasi kemudian bergerak maju sejauh 2 mm dan mundur sejauh 2 mm dari titik awal. Dapat diketahui juga untuk rentang jarak dari silinder ditentukan sebesar 4 mm. Pergerakan ini akan terus berulang dan kontinyu. Trayektori yang memiliki nilai awal atau berada pada titik 1 mm akan bergerak dan melakukan *tracking* terhadap sinyal referensi. Dengan diberikan posisi awal 1, pada detik ke 10 trayektori yang berupa respon *plant* dapat melakukan *tracking* terhadap sinyal referensi, waktu inilah yang dinamakan *rise time* pada sistem. Sementara respon tanpa kontroler memiliki *rise time* sebesar 11,3 detik.



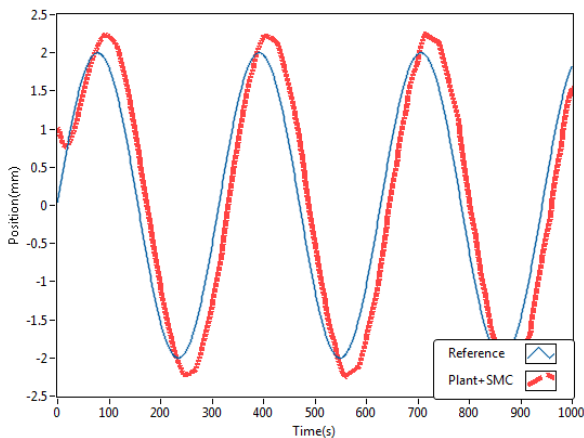
Gambar 4.3. *Tracking* Sinyal Referensi saat $\lambda = 35$

Pengujian berikutnya dengan mengubah parameter *sliding mode* menjadi sebesar 35 sehingga didapatkan respon seperti tampak pada Gambar 4.3. Tujuan dari pengujian ini adalah melihat apakah pengurangan dari nilai parameter kontroler mempengaruhi kepresisian dari sistem saat melakukan *tracking* terhadap referensi sinyal. Parameter *sliding mode* dapat mempengaruhi kepresisian pada sistem. Dibuktikan pada detik ke 80 respon mengalami kesalahan pembacaan sebesar 0,08 mm. *Rise time* menjadi sebesar 10,2 detik dengan diberikan posisi awal pada 1 mm. Sesuai dengan teori dari SMC bahwa semakin kecil nilai parameter *sliding mode* maka kepresisian akan berkurang karena pengaruhnya terhadap penentuan *sliding surface*. Sehingga nilai kesalahan yang terjadi semakin besar. Pada Gambar 4.4, parameter *sliding mode* diubah menjadi sebesar 20. Kecepatan silinder untuk melakukan *tracking* posisi lebih lambat dan pengurangan parameter juga mengurangi kepresisian dari silinder. Tujuan dari pengujian ini adalah membandingkan dan menganalisa apakah pengurangan dari nilai parameter mempengaruhi kepresisian dari sistem saat melakukan *tracking*. Parameter *sliding mode* ternyata dapat mempengaruhi kepresisian pada sistem.



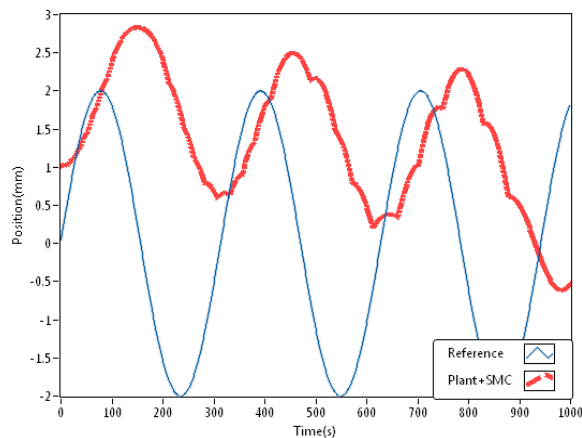
Gambar 4.4. *Tracking* Sinyal Referensi saat $\lambda = 20$

Dibuktikan pada detik ke 80 atau waktu pada keadaan sebelumnya respon mengalami kesalahan pembacaan sebesar 0,14 mm. *Settling time* menjadi sebesar 10,3 detik dengan diberikan posisi awal pada 1 mm.



Gambar 4.5. *Tracking* Sinyal Referensi saat $\lambda = 5$

Pada pengujian selanjutnya, dengan parameter *sliding mode* diubah menjadi 5 didapatkan respon seperti tampak pada Gambar 4.5. *Plant* tidak mampu lagi untuk melakukan *tracking* posisi terhadap referensi secara sempurna pada detik 80 seperti pada percobaan sebelumnya. Pada saat respon dalam keadaan peralihan respon masih mampu menjaga posisinya terhadap referensi namun sudah tampak kesalahan pembacaan pada saat tahap ini.

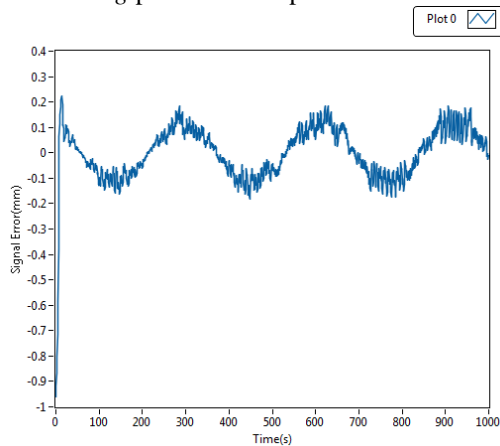


Gambar 4.6. *Tracking* Sinyal Referensi saat $\lambda = 0$

Pengujian saat parameter *Sliding Mode* bernilai sama dengan 0 ditunjukkan pada Gambar 4.6, *plant* tidak mampu untuk melakukan *tracking* posisi terhadap sinyal referensi secara sempurna. Respon tidak mengikuti bentuk sinyal referensi dan memiliki nilai yang terus meningkat. Pada keadaan peralihan maupun saat keadaan *switching* nilai maksimum dan minimumnya nilai kesalahan cukup besar. Sesuai dengan teori yang disebutkan pada *sliding mode* bahwa semakin nilai parameter *sliding mode* mendekati 0, maka *tracking* posisi juga tidak lebih baik. Sesuai dengan teori pada penentuan *sliding surface*, bahwa parameter *sliding mode* harus dipilih lebih dari nol. Dibuktikan dari pengujian pertama hingga pengujian keempat bahwa semakin besar nilai parameter kontroler maka *tracking* posisi semakin presisi dan waktu yang dibutuhkan menjadi lebih cepat.

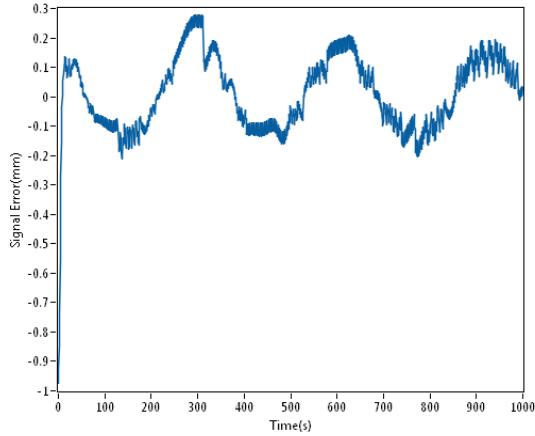
4.2.2 Sinyal Kesalahan

Pada sinyal kesalahan diketahui terjadi *chattering* pada saat Perlu diperhatikan bahwa sinyal kesalahan ini terjadi saat perubahan dari mode *charge* dan *discharge* pada silinder. Pada kondisi riil besarnya sinyal kesalahan ini mempengaruhi pergerakan silinder seperti ditunjukkan pada Gambar 4.7. *Plant* tidak dapat melakukan *tracking* posisi terhadap referensi secara keseluruhan akibat dari pembacaan *state* posisi menjadi negatif dan menyebabkan nilainya akan terus naik atau silinder akan bergerak maju. Jika nilai kontroler kurang dari sama dengan 0, maka *tracking* posisi tidak dapat dilakukan.

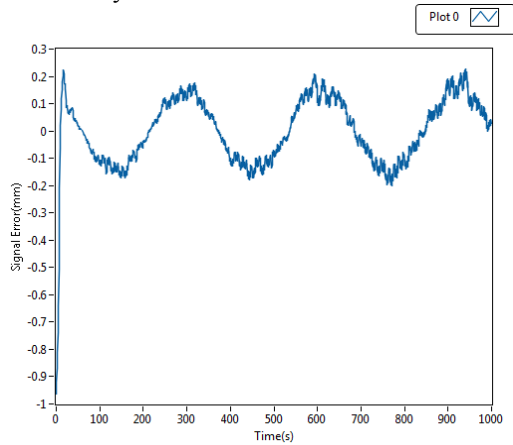


Gambar 4.7. Sinyal Kesalahan untuk $\lambda = 50$

Pada Gambar 4.8 ditunjukkan sinyal kesalahan untuk $\lambda = 35$. Terlihat bahwa sinyal kesalahan memiliki *chattering* yang lebih kecil dibandingkan dengan saat nilai $\lambda = 50$. Hal ini terjadi akibat dalam teori penentuan *sliding surface*, parameter λ mempengaruhi posisi. Sinyal kesalahan ini menunjukkan perbedaan dari keluaran sistem dalam hal ini perubahan posisi silinder. Sementara kecepatan dari silinder tidak ditampilkan dalam bentuk grafik meskipun memiliki pengaruh pada sistem. Dalam riil sistem, meskipun silinder dapat melakukan *tracking* sinyal referensi yang diberikan karena terjadi kesalahan yang besar saat parameter λ diperbesar pula akan berkurangnya efektifitas dari sistem. Dengan merubah persamaan *control law* yang tepat, maka masalah ini dapat teratasi.

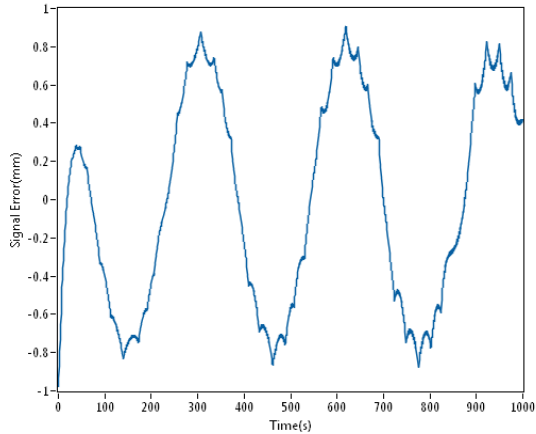


Gambar 4.8. Sinyal Kesalahan untuk $\lambda = 35$



Gambar 4.9. Sinyal Kesalahan untuk $\lambda = 20$

Pada Gambar 4.9 secara berurutan ditunjukkan sinyal kesalahan untuk $\lambda = 20$. Sesuai dengan teori yang telah dibahas pada Bab III semakin berkurang nilai pada parameter λ juga dapat mengurangi sinyal kesalahan yang terjadi, sehingga lebih efektif saat silinder melakukan *tracking* terhadap sinyal referensi



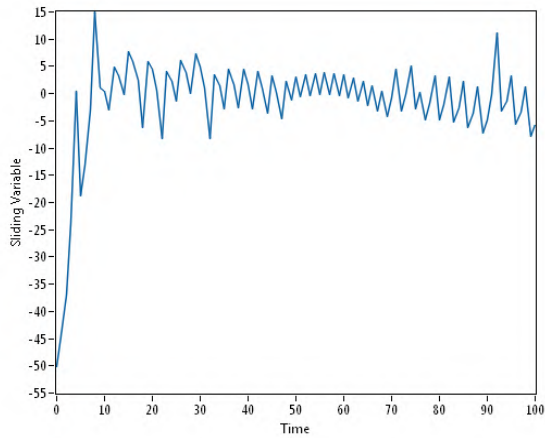
Gambar 4.10. Sinyal Kesalahan untuk $\lambda = 5$

Tabel 4.1 Perbandingan Parameter *Sliding* dengan Nilai Kesalahan

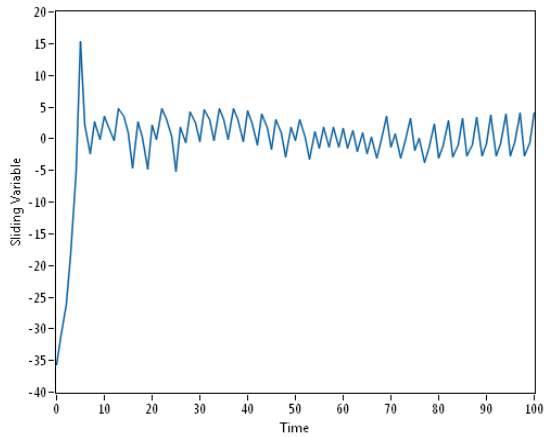
No.	Parameter	Nilai Kesalahan(mm)
1	50	0,04
2	45	0,06
3	40	0,08
4	35	0,10
5	30	0,12
6	25	0,14
7	20	0,16
8	15	0,18
9	10	0,20
10	5	0,22

Efek penambahan parameter pada sistem *tracking* posisi silinder adalah dapat menambah kesalahan pembacaan posisi silinder sebesar 0,02 mm. Penambahan parameter mampu mengurangi kesalahan pembacaan posisi, tetapi efek yang terjadi adalah *chattering* menjadi semakin besar. Jika parameter *sliding mode* diberikan nilai kurang dari sama dengan 0, maka aturan diatas tidak dapat diterapkan karena saat parameter bernilai nol maka kesalahan posisi akan bernilai nol, sesuai pada persamaan *sliding surface*.

4.2.3 *Sliding Surface*

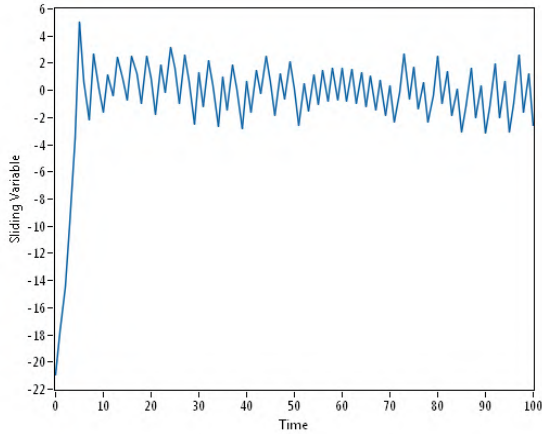


Gambar 4.11. *Sliding Surface* untuk $\lambda = 50$

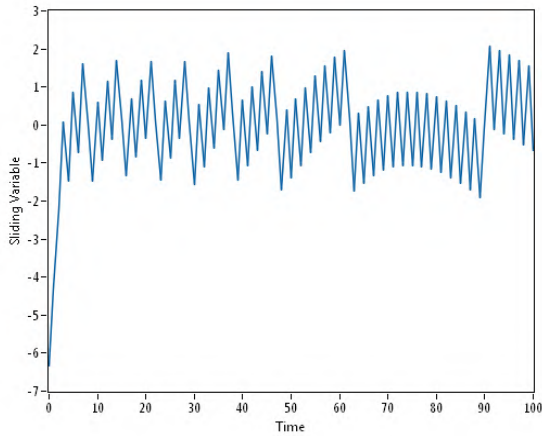


Gambar 4.12. *Sliding Surface* untuk $\lambda = 35$

Pada Gambar 4.11 dan Gambar 4.12 secara berurutan ditunjukkan *sliding surface* untuk $\lambda = 50$ dan $\lambda = 35$. Terbukti bahwa *sliding variable* tidak memiliki nilai yang stabil jika semakin besar parameter λ .

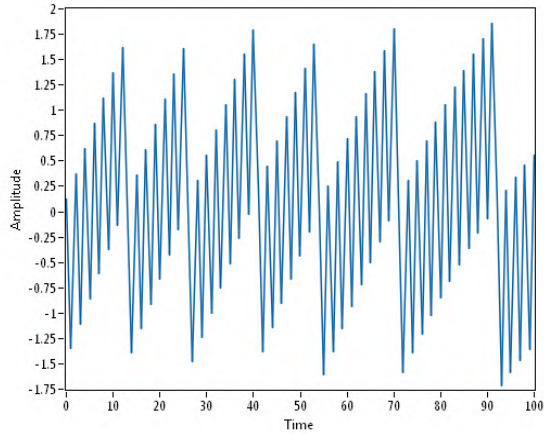


Gambar 4.13. *Sliding Surface* untuk $\lambda = 20$



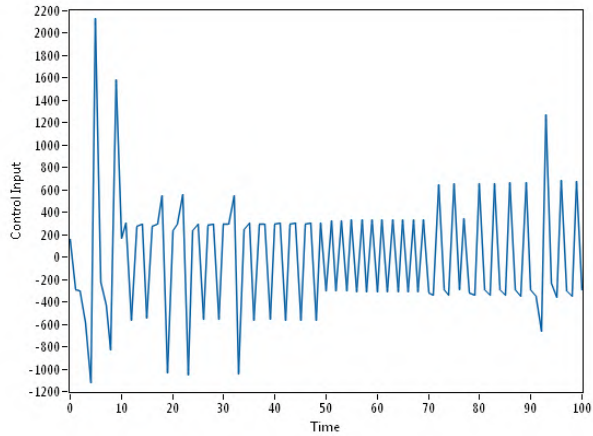
Gambar 4.14. *Sliding Surface* untuk $\lambda = 5$

Pada Gambar 4.13, Gambar 4.14, dan Gambar 4.15 secara berurutan ditunjukkan *sliding surface* untuk $\lambda = 20$, $\lambda = 5$, dan $\lambda = 0$. Terbukti bahwa *sliding variable* tidak memiliki nilai yang stabil jika semakin besar parameter λ . Saat nilainya kurang dari sama dengan 0 maka *sliding variabel* tidak memiliki nilai tunak.



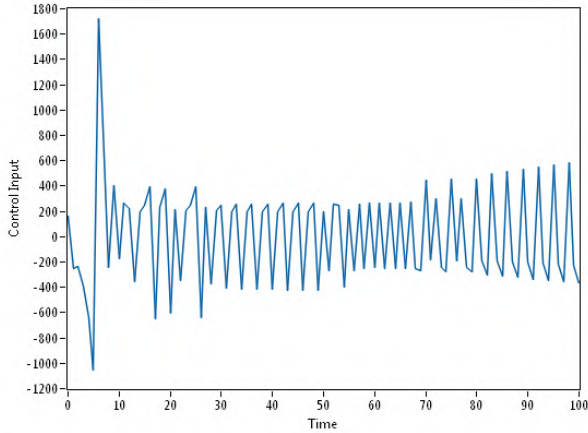
Gambar 4.15. *Sliding Surface* untuk $\lambda = 0$

4.2.4 *Control law*

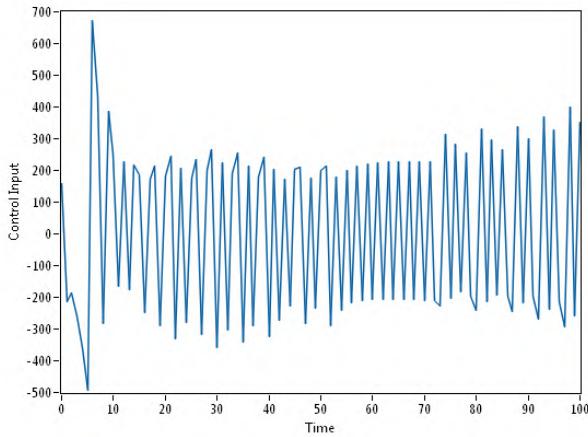


Gambar 4.16. *Control Law* untuk $\lambda = 50$

Pada Gambar 4.16 dan Gambar 4.17 secara berurutan ditunjukkan *control law* untuk $\lambda = 50$ dan $\lambda = 35$. Terbukti bahwa *control input* memiliki nilai yang berubah semakin besar parameter λ . Perubahan ini menunjukkan nilai dari sinyal signumnya.

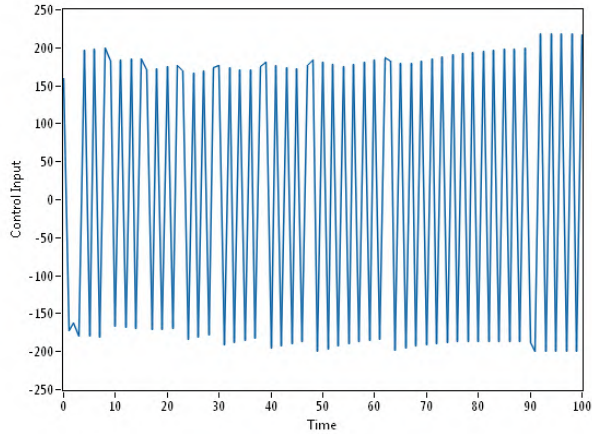


Gambar 4.17. *Control Law* untuk $\lambda = 35$

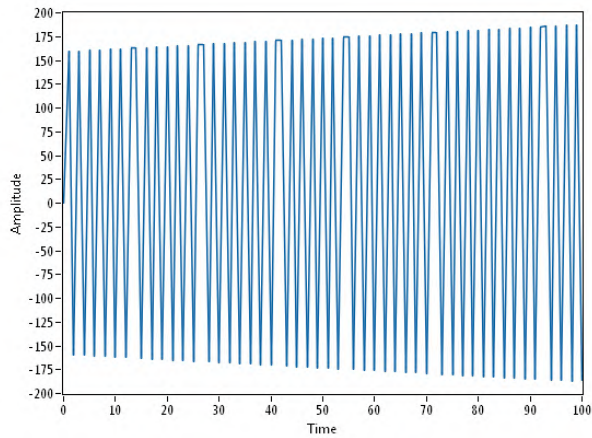


Gambar 4.18. *Control Law* untuk $\lambda = 20$

Pada Gambar 4.18, Gambar 4.19, dan Gambar 4.20. Secara berurutan ditunjukkan *control law* untuk $\lambda = 20$, $\lambda = 5$, dan $\lambda = 0$. Terbukti bahwa *control input* memiliki nilai yang berubah semakin besar parameter λ . Perubahan ini menunjukkan nilai dari sinyal signumnya. Saat $\lambda = 0$ respon tidak lagi dalam keadaan tunak dan naik.



Gambar 4.19. *Control Law* untuk $\lambda = 5$

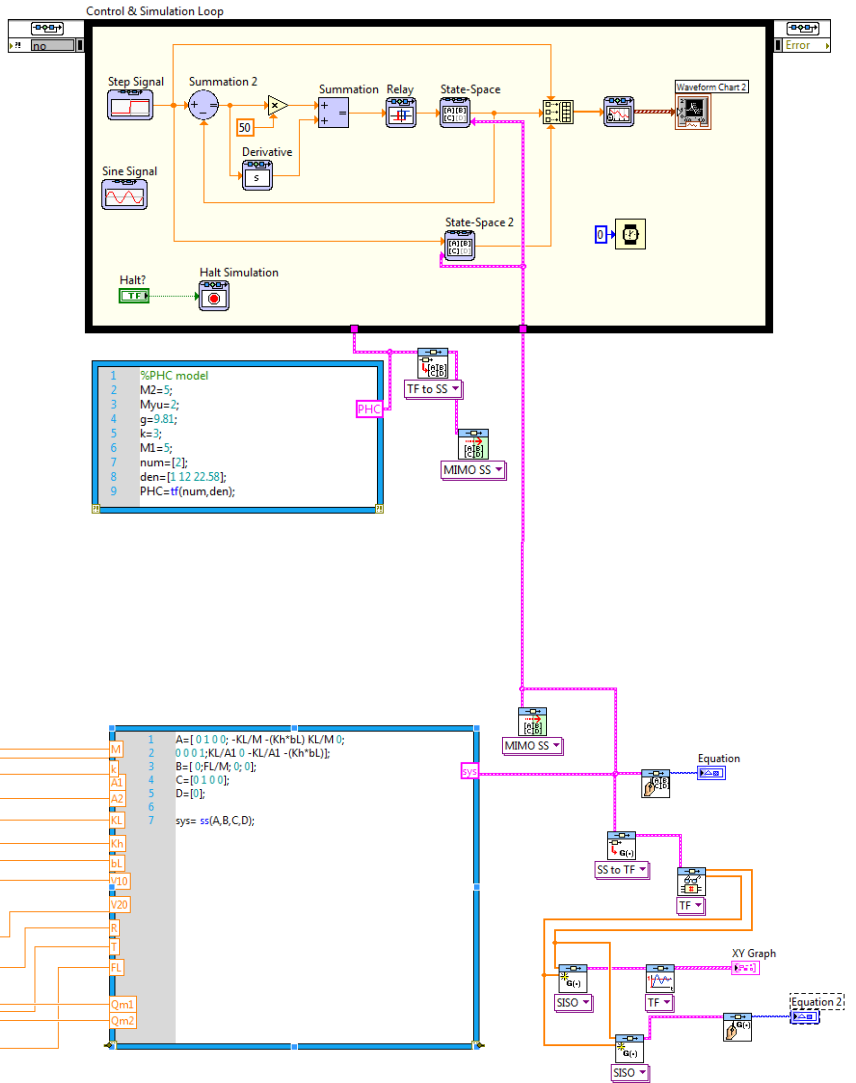


Gambar 4.20. *Control Law* untuk $\lambda = 0$

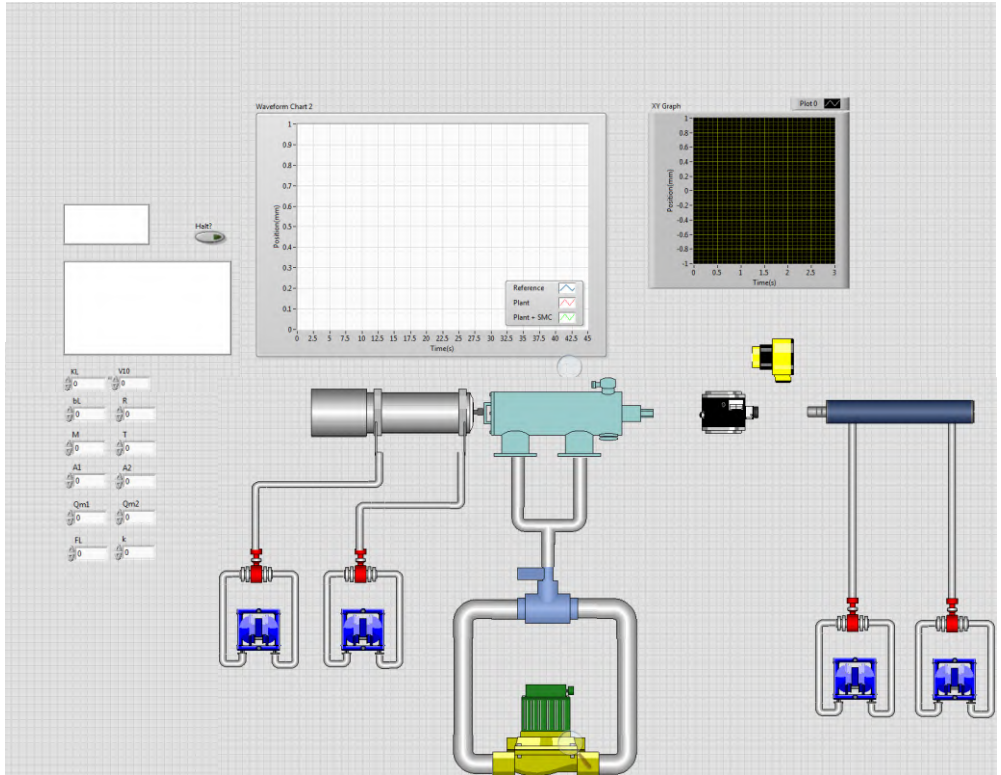
Perubahan yang terjadi sekitar 0,030. Perubahan posisi yang terjadi sangat kecil sehingga tidak mempengaruhi sistem. Sistem tetap dalam sliding mode. Hal ini berarti kontroler dapat mengatasi gangguan. Sinyal kontrol u sedikit berosilasi karena adanya pengaruh gangguan., namun sistem dapat mencapai keadaan tunaknya.

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

LAMPIRAN A



LAMPIRAN B



BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Penelitian ini bertujuan merancang model sistem *Pneumatic-Hydraulic Combination Control* (PHCC), di mana sistem ini menggunakan katup solenoid *on/off* yang menyebabkan sifat nonlinier pada sistem dan silinder pneumatik-hidrolik yang merupakan kombinasi antara silinder pada sistem pneumatik dan sistem hidrolik. Terlihat saat sistem melakukan *tracking* posisi terhadap sinyal referensi, semakin besar perubahan parameter *sliding mode* atau semakin positif, maka kemampuan *plant* untuk *tracking* terhadap sinyal referensi semakin baik. Sinyal kesalahan juga semakin berkurang. Efek dari perubahan parameter kontroler adalah dapat memperbesar atau memperkecil kecepatan dan kepresisian dari silinder pneumatik-hidrolik. *Rise time* sistem tanpa kontroler sebesar 11,3 detik menjadi 10 detik untuk *tracking* posisi silinder di mana parameter *sliding mode* bernilai positif. Kesalahan pembacaan posisi silinder yang semula 0,5 mm menjadi 0,3 mm.

5.2 Saran

Dari hasil penelitian, diketahui bahwa *chattering* tetap terjadi pada sistem meskipun kontroler telah diimplementasikan. Untuk penelitian selanjutnya, dengan mengubah fungsi kontrol signum dengan saturasi atau dengan kata lain merubah *switching control* (u_n) dengan fungsi *boundary layer* dapat menghilangkan *chattering* sehingga sistem menjadi stabil dan performa silinder dapat meningkat. Selain itu, problem ini dapat diatasi dengan mempertimbangkan pemilihan katup dan sensor yang sesuai.

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Hongyan Wang, Kheding Zhao, Xianghua Cui, "Sliding Control approach to Pneumatic Hydraulic Combination Control(PHCC) Servo System," *Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation(WCICA)*, Piscataway, USA:IEEE, pp. 2156-2159, 2006.
- [2] H.Xu, "Theory analysis and study of control method of PHCC position system," *Dissertation for the doctoral degree in engineering*, Harbin Institute of Technology, 2001.
- [3] Hongyan Wang, Kheding Zhao, and Xiufen Xu, "Pneumatic Hydraulic Combination Compliant Force Control System with Adaptive Experiments," *Journal of Xi'an Jiaotong University*, pp.1106-1109, 2007.
- [4] Z.Wu, "Drive and control of the pneumatic system," *Heilongjiang: Harbin Institute of Technology Press*, pp.2-12, 1998.
- [5] Y.Cao, "Drive and control of the hydraulic system," *Tianjin: Tianjin university Press*, pp.1-5, 2003.
- [6] Ogata, K., "*Modern Control Engineering 3rd. Edition*", Prentice-Hall, Minnesota, 1997.
- [7] M.A.Flores-Rangle and R.Castro-linares, "Position control of a pneumatic actuator using sliding mode," *In Proc. In SIAM conf. Control and it's Appl.*, 1992.
- [8] J.-J. E. Slotine and W.Li, "*Applied Nonlinear Control*," Prentice Hall, 1991.
- [9] X.Xu, K.Zhao and L.Yuan, "Performance analysis and experimental investigation to pneumatic-hydraulic combination control system," *Journal of Xi'an Jiaotong University*, vol.39, no.3, pp.266-269, 2005.
- [10] Jeremy, G., Antwerp, V., dan D. Braatz, R., "A Tutorial on Linear and Bilinear Matrix Inequalities," *Journal of Process Control*, vol. 10, pp. 363-385, 2000.

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

RIWAYAT PENULIS



Denny Ferdian lahir di Semarang, 25 Februari 1994. Ia merupakan anak ketiga dari pasangan Frena Aryani dan Edy Purwanto. Ia menempuh pendidikan Sekolah Dasar di SDN Sawojajar IV sejak tahun 2000 hingga 2006, melanjutkan pendidikan menengah pertama di SMPN 5 Malang pada tahun 2006 hingga 2009, dan pendidikan menengah atas di SMAN 5 Malang sejak tahun 2009 hingga 2012. Sejak tahun 2012 hingga saat ini, penulis menempuh pendidikan sarjana dan berada pada tahun terakhir di jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya bidang studi Teknik Sistem Pengaturan.

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----